

Enciclopedia del c á todo de tungsteno de bario

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Líder mundial en fabricación inteligente para las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, una subsidiaria de propiedad absoluta con personalidad jurídica independiente establecida por CHINATUNGSTEN ONLINE, se dedica a promover el diseño y la fabricación inteligentes, integrados y flexibles de materiales de tungsteno y molibdeno en la era de Internet industrial. CHINATUNGSTEN ONLINE, fundada en 1997 con www.chinatungsten.com como punto de partida (el primer sitio web de productos de tungsteno de primer nivel de China), es la empresa de comercio electrónico pionera del país centrada en las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Aprovechando casi tres décadas de profunda experiencia en los campos del tungsteno y el molibdeno, CTIA GROUP hereda las excepcionales capacidades de diseño y fabricación, los servicios superiores y la reputación comercial global de su empresa matriz, convirtiéndose en un proveedor integral de soluciones de aplicación en los campos de productos químicos de tungsteno, metales de tungsteno, carburos cementados, aleaciones de alta densidad, molibdeno y aleaciones de molibdeno.

En los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha creado más de 200 sitios web profesionales multilingües sobre tungsteno y molibdeno, disponibles en más de 20 idiomas, con más de un millón de páginas de noticias, precios y análisis de mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Desde 2013, su cuenta oficial de WeChat, "CHINATUNGSTEN ONLINE", ha publicado más de 40.000 artículos, atendiendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita a diario a cientos de miles de profesionales del sector en todo el mundo. Con miles de millones de visitas acumuladas a su sitio web y cuenta oficial, se ha convertido en un centro de información global y de referencia para las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, ofreciendo noticias multilingües, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado 24/7.

Basándose en la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando tecnología de IA, diseña y produce en colaboración con los clientes productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como tamaño de partícula, densidad, dureza, resistencia, dimensiones y tolerancias). Ofrece servicios integrales de proceso completo que abarcan desde la apertura del molde y la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de I+D, diseño y producción para más de 500.000 tipos de productos de tungsteno y molibdeno a más de 130.000 clientes en todo el mundo, sentando las bases para una fabricación personalizada, flexible e inteligente. Con esta base, CTIA GROUP profundiza aún más en la fabricación inteligente y la innovación integrada de materiales de tungsteno y molibdeno en la era del Internet Industrial.

El Dr. Hanns y su equipo en CTIA GROUP, con más de 30 años de experiencia en la industria, han escrito y publicado análisis de conocimiento, tecnología, precios del tungsteno y tendencias del mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, compartiéndolos libremente con la industria del tungsteno. El Dr. Han, con más de 30 años de experiencia desde la década de 1990 en el comercio electrónico y el comercio internacional de productos de tungsteno y molibdeno, así como en el diseño y la fabricación de carburos cementados y aleaciones de alta densidad, es un reconocido experto en productos de tungsteno y molibdeno tanto a nivel nacional como internacional. Fiel al principio de proporcionar información profesional y de alta calidad a la industria, el equipo de CTIA GROUP escribe continuamente documentos de investigación técnica, artículos e informes de la industria basados en las prácticas de producción y las necesidades de los clientes del mercado, obteniendo amplios elogios en la industria. Estos logros brindan un sólido respaldo a la innovación tecnológica, la promoción de productos y los intercambios industriales de CTIA GROUP, impulsándolo a convertirse en un líder en la fabricación de productos de tungsteno y molibdeno y en servicios de información a nivel mundial.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Tabla de contenidos

Prefacio

Propósito y significado

Descripción general de la estructura del libro

Público objetivo

Capítulo 1: Descripción general de los cátodos de tungsteno con bario

1.1 Definición y concepto básico del cátodo de tungsteno de bario

1.1.1 Definición de cátodo de bario y tungsteno

1.1.2 Comparación del cátodo caliente y el cátodo frío

1.1.3 Comparación de cátodos de bario y tungsteno con otros cátodos térmicos

1.2 Desarrollo histórico del cátodo de tungsteno de bario

1.2.1 Origen y evolución técnica de los cátodos de bario y tungsteno

1.2.2 Hitos clave y avances tecnológicos

1.3 Campos de aplicación de los cátodos de bario y tungsteno

1.3.1 Electrónica de vacío

1.3.2 Usos específicos en la industria y la investigación científica

1.3.3 Potencial entre dominios

Capítulo 2: Ciencia de los materiales de los cátodos de tungsteno de bario

2.1 Composición del material del cátodo de bario y tungsteno

2.1.1 Propiedades químicas y físicas de la matriz de tungsteno porosa

2.1.2 Propiedades y proporciones de los compuestos de bario

2.1.3 Efecto de los aditivos en el rendimiento de las emisiones

2.2 Proceso de preparación del cátodo de tungsteno de bario

2.2.1 Preparación de la matriz de tungsteno poroso: pulvimetalurgia y control de poros

2.2.3 Proceso de impregnación de compuestos de bario: preparación de la solución y parámetros de impregnación

2.3 Microestructura y propiedades de los cátodos de bario y tungsteno

2.3.1 Análisis de porosidad y estructura de la matriz de tungsteno porosa

2.3.2 Relación entre la morfología de la superficie y el comportamiento de emisión de la capa activa de bario

Capítulo 3: Principio de funcionamiento y mecanismo de lanzamiento

3.1 Teoría de la emisión termoiónica

3.1.1 Ecuación de Richardson-Dushman

3.1.2 Efecto Schottky y emisión mejorada en campo

3.1.3 Perspectiva de la mecánica cuántica

3.2 Características de emisión de los cátodos de bario y tungsteno

3.2.1 Mecanismo de formación de la función de baja potencia

3.2.2 Comportamiento dinámico y estabilidad térmica de las capas activas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

3.3 Factores que afectan el rendimiento de emisión del cátodo de bario y tungsteno

3.3.1 Entorno de trabajo

3.3.2 Mecanismo del envejecimiento y efectos de toxicidad

3.3.3 Análisis del modo de falla

Capítulo 4: Tecnología de fabricación y procesamiento del cátodo de tungsteno de bario

4.1 Moldeo de matriz de tungsteno poroso

4.1.1 Proceso de cribado y prensado del polvo de tungsteno

4.1.2 Optimización de la porosidad y la resistencia mecánica

4.2 Impregnación y activación de compuestos de bario

4.2.1 Proceso de impregnación: formulación del compuesto de bario y condiciones de impregnación

4.2.2 Proceso de activación: tratamiento térmico y formación de la capa superficial activa

4.3 Control de calidad y pruebas de cátodos de bario y tungsteno

4.3.1 Método de prueba para la calidad de transmisión

4.3.2 Criterios de evaluación de consistencia y confiabilidad

4.3.3 Análisis y mejora de fallas

Capítulo 5: Aplicación del cátodo de tungsteno de bario

5.1 Electrónica de vacío

5.1.1 Tubo de microondas

5.1.1.1 Magnetron: Utilizado en equipos de calentamiento por radar y microondas

5.1.1.2 TWT: Comunicaciones de alta frecuencia y amplificadores de satélite

5.1.1.3 Tubo Klystron: Radar de alta potencia y acelerador de partículas

5.1.2 Tubos de rayos X

5.1.2.1 Equipos de imágenes médicas

5.1.2.2 Ensayos industriales no destructivos

5.1.3 Otros dispositivos de vacío

5.2 Instrumentos científicos

5.2.1 Microscopio electrónico

5.2.2 Espectrómetro de masas: fuente de iones de alta sensibilidad

5.2.3 Equipo de análisis de superficies

5.3 Aplicaciones industriales y de comunicación

5.3.1 Sistema de radar

5.3.2 Equipos de comunicación

5.3.3 Tubo del interruptor de vacío

5.4 Aeroespacial y Defensa

5.4.1 Dispositivos electrónicos espaciales

5.4.2 Sistema electrónico de contramedidas

5.5 Aplicaciones emergentes y entre dominios

5.5.1 Generador de ondas de terahercios

5.5.2 Propulsores iónicos

5.5.3 Experimentos de física de altas energías

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5.4 Aplicaciones biomédicas

Capítulo 6: Optimización y mejora del rendimiento del cátodo de bario y tungsteno

6.1 Mejorar la eficiencia del lanzamiento

6.1.1 Optimización de la estructura de poros de la matriz de tungsteno porosa

6.1.2 Formulación y tecnología de dopaje de nuevos compuestos de bario

6.1.3 Aplicaciones de la nanotecnología

6.2 Prolongar la vida útil

6.2.1 Proceso antienvenamiento

6.2.2 Mejora de la estabilidad térmica y la resistencia mecánica

6.3 Adaptabilidad ambiental

6.3.1 Rendimiento en entornos extremos

6.3.2 Bajo consumo de energía y fabricación ecológica

6.4 Diseño inteligente

Capítulo 7: Desafíos y desarrollo futuro

7.1 Cuellos de botella técnicos actuales

7.1.1 Costo del material y complejidad de la preparación

7.1.2 Consistencia del rendimiento y desafíos de producción en masa

7.1.3 Desafíos de la cadena de suministro

7.2 Competencia de tecnología emergente

7.2.1 Tecnología de cátodo frío

7.2.2 Otros cátodos térmicos

7.2.3 Análisis de la ventaja competitiva de los cátodos de bario y tungsteno

7.3 Direcciones futuras de la investigación

7.3.1 Exploración de nuevos materiales y procesos

7.3.2 Diseño de cátodos inteligente y adaptativo

7.3.3 Investigación interdisciplinaria

Capítulo 8: Estándares de cátodo de tungsteno y bario

8.1 Estándares internacionales y de la industria

8.1.1 Normas internacionales relacionadas con los cátodos de tungsteno de bario

8.1.2 Estándares de la industria relacionados con los cátodos de tungsteno de bario

8.2 Especificación de los parámetros de rendimiento del cátodo de tungsteno de bario

8.2.1 Requisitos de normalización para los parámetros clave

8.2.2 Métodos de prueba y procesos de verificación

8.3 Estándares de control de calidad y fabricación de cátodos de tungsteno y bario

8.3.1 Especificaciones para la pureza del material y el proceso de preparación

8.3.2 Requisitos de coherencia y trazabilidad

8.4 Normas ambientales y de seguridad

8.4.1 Tratamiento de seguridad y especificaciones de protección ambiental para compuestos de bario

8.4.2 Directrices de cumplimiento en la producción y el uso

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.3 Especificaciones de eliminación de residuos

Apéndice

A. Glosario

B. Referencias

C. Normas y especificaciones de prueba

Estándares internacionales

Estándar de la industria

Estándares nacionales y de la industria china

D. Proveedores y recursos

Introducción a CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD Electrodo de bario y tungsteno Sitios web relacionados

E. Índice

Índice de palabras clave

Índice de temas



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Prefacio

Propósito y significado

El cátodo de tungsteno de bario, como material eficiente que emite termiones, ocupa una posición fundamental en el campo de la tecnología electrónica moderna. Sus propiedades principales (baja función de trabajo, alta densidad de corriente de emisión y excelente estabilidad térmica y larga vida útil) se derivan de la ingeniosa combinación de una matriz de tungsteno porosa con un compuesto de bario como el aluminato de bario y calcio. Este diseño único hace que los cátodos de tungsteno de bario sean ideales para dispositivos electrónicos de vacío (como tubos de microondas, tubos de rayos X y tubos fotomultiplicadores) y se utilizan ampliamente en campos de vanguardia como la industria aeroespacial, imágenes médicas, sistemas de comunicación, instrumentos científicos y experimentos de física de alta energía. Los cátodos de tungsteno de bario no solo promueven el avance continuo de la tecnología electrónica de vacío, sino que también brindan soporte potencial para tecnologías emergentes como generadores de ondas de terahercios y propulsores iónicos.

Este libro está diseñado para proporcionar a los lectores un material de referencia completo y sistemático para los cátodos de tungsteno de bario, que cubre su ciencia de materiales, proceso de fabricación, principio de funcionamiento, campos de aplicación y tendencias de desarrollo futuras. Esperamos descubrir su papel fundamental en la electrónica de alto rendimiento profundizando en los detalles técnicos de los cátodos de bario-tungsteno, mientras exploramos su potencial de innovación en campos interdisciplinarios.

Descripción general de la estructura del libro

Este libro tiene una estructura clara, desde lo básico hasta la aplicación, desde la teoría hasta la práctica, rigor lógico, capa por capa, dividido en ocho capítulos y apéndices, que cubren completamente todos los aspectos de los cátodos de tungsteno de bario:

- **Capítulo 1: Descripción general de los cátodos de tungsteno con bario**
Este capítulo sienta las bases del libro, introduciendo la definición, los conceptos básicos y las comparaciones de los cátodos de bario y tungsteno y su comparación con otros cátodos fríos y calientes, clasificando el contexto histórico de su evolución desde su origen hasta la tecnología moderna, y esbozando su amplia gama de aplicaciones en dispositivos electrónicos de vacío, industria e investigación científica.
- **Capítulo 2: Ciencia de los materiales de los cátodos de tungsteno de bario**
Este capítulo profundiza en la composición del material y el proceso de preparación de los cátodos de tungsteno de bario, analiza las propiedades químicas y físicas de las matrices porosas de tungsteno, los compuestos de bario y los aditivos, y revela la relación interna entre la microestructura (como la porosidad y la morfología de la superficie) y las propiedades de emisión.
- **Capítulo 3: Principio de funcionamiento y mecanismo de emisión**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Este capítulo parte de la teoría de la emisión termoiónica y combina la ecuación de Richardson-Dushman, el efecto Schottky y la mecánica cuántica para analizar en detalle el mecanismo de formación de la función de bajo trabajo del cátodo de tungsteno de bario, el comportamiento dinámico de la capa activa y los factores ambientales que afectan el rendimiento de la emisión.

- **Capítulo 4: Tecnología de fabricación y procesamiento del cátodo de tungsteno de bario**

Este capítulo se centra en el proceso de fabricación, cubriendo el moldeo pulvimetalúrgico de la matriz de tungsteno poroso, el proceso de impregnación y activación de compuestos de bario, y los métodos de prueba y control de calidad de las propiedades de emisión, proporcionando referencia técnica para la producción industrial.

- **Capítulo 5: Aplicación del cátodo de tungsteno de bario**

Este capítulo clasifica sistemáticamente las aplicaciones específicas del cátodo de tungsteno de bario en dispositivos electrónicos de vacío (como tubos de microondas, tubos de rayos X), instrumentos científicos (como microscopios electrónicos, espectrómetros de masas), comunicaciones industriales, aeroespacial y campos emergentes, destacando su potencial de campo cruzado.

- **Capítulo 6: Optimización y mejora del rendimiento del cátodo de bario y tungsteno**

Este capítulo analiza estrategias para mejorar la eficiencia de las emisiones, prolongar la vida útil y mejorar la adaptabilidad ambiental, incluidos métodos de vanguardia como nuevas formulaciones de compuestos de bario, aplicaciones de nanotecnología y diseño inteligente.

- **Capítulo 7: Desafíos y desarrollos futuros**

Este capítulo analiza los cuellos de botella técnicos actuales (como los costos de los materiales, la consistencia del rendimiento) y los desafíos de las tecnologías competidoras, como los cátodos fríos, y espera la dirección futura de nuevos materiales, nuevos procesos e investigación interdisciplinaria (como la inteligencia artificial y la computación cuántica).

- **Capítulo 8: Estándares de cátodo de tungsteno y bario**

Este capítulo presenta estándares internacionales e industriales relacionados con cátodos de bario y tungsteno, que cubren especificaciones de parámetros de rendimiento, métodos de prueba, procesos de fabricación y requisitos de seguridad ambiental, proporcionando pautas para la producción estandarizada.

- **Apéndices e índices**

Los apéndices incluyen glosarios, referencias, estándares de prueba, hojas de datos de rendimiento e información de proveedores (por ejemplo, CTIA GROUP LTD) para facilitar la referencia y la investigación en profundidad. La sección de indexación proporciona índices de palabras clave y temas para una rápida segmentación de contenido.

El diseño del contenido de este libro se centra en la combinación de teoría y práctica, con discusiones en profundidad sobre ciencia básica y orientación detallada sobre aplicaciones de ingeniería, con el objetivo de proporcionar a los lectores un sistema de conocimiento completo y práctico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Público objetivo

Este libro está destinado a una amplia gama de lectores, incluidos, entre otros:

- **Científicos de materiales:** preste atención a la composición del material, la microestructura y el proceso de preparación de los cátodos de tungsteno de bario, y busque avances en nuevos materiales y procesos.
- **Ingeniero electrónico:** Dedicado al diseño y desarrollo de dispositivos electrónicos de vacío, es necesario dominar el principio de funcionamiento y la tecnología de fabricación del cátodo de tungsteno de bario.
- **Investigadores de tecnología electrónica de vacío :** se centran en la optimización del rendimiento, la expansión de aplicaciones y la investigación de estandarización de cátodos térmicos.
- **Técnicos industriales:** aplican cátodos de tungsteno de bario en la producción y mantenimiento de tubos de microondas, tubos de rayos X, sistemas de radar y otros equipos.
- **Innovadores interdisciplinarios:** Explorando el potencial de los cátodos de tungsteno de bario en campos emergentes como la tecnología de terahercios, propulsores iónicos, biomedicina y más.
- **Profesores y estudiantes en colegios y universidades:** Este libro se puede utilizar como libro de texto de posgrado o libro de referencia para especializaciones en ciencia de materiales, ingeniería electrónica, tecnología electrónica de vacío, etc., para brindar apoyo a la investigación académica y la enseñanza.

Ya sea que sea un recién llegado a los cátodos de tungsteno de bario o un experto con años de experiencia en campos relacionados, este libro tiene como objetivo brindarle un marco de conocimiento claro, conocimientos técnicos profundos y guías prácticas de aplicación.

Escribir entidades y valores

Este libro se centra en las siguientes características del proceso de escritura para garantizar que su valor académico y su practicidad estén equilibrados:

- **Integral y sistemático**
Este libro cubre de manera integral todas las dimensiones de los cátodos de bario y tungsteno, desde la teoría básica hasta las aplicaciones de vanguardia, desde la ciencia de los materiales hasta los estándares industriales, y construye un sistema de conocimiento completo para garantizar que los lectores puedan comprender sistemáticamente el contenido relevante.
- **Combinando teoría y práctica**
Al tiempo que expone en profundidad la teoría de la emisión termoiónica y los principios de la ciencia de los materiales, este libro proporciona procesos de fabricación detallados, métodos de prueba de rendimiento y casos de aplicación práctica, teniendo en cuenta las necesidades de la investigación académica y la práctica de la ingeniería.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Innovador y con visión de futuro**

Este libro no solo resume los logros técnicos existentes de los cátodos de tungsteno de bario, sino que también espera su futura dirección de desarrollo en nanotecnología, diseño inteligente e investigación interdisciplinaria (como inteligencia artificial y computación cuántica), brindando a los lectores inspiración innovadora.

- **Utilidad y operatividad**

El glosario, las hojas de datos de rendimiento, los estándares de prueba y la información del proveedor (por ejemplo, CTIA GROUP LTD) en el apéndice brindan a los lectores recursos de referencia convenientes. El diseño del índice facilita la orientación rápida del contenido clave y mejora su utilidad.

A través de este libro, los lectores no solo pueden comprender profundamente la connotación científica y técnica de los cátodos de tungsteno de bario, sino también inspirarse en ellos para promover la innovación y el desarrollo en la tecnología de electrónica de vacío y campos relacionados. Creemos que los cátodos de bario-tungsteno, como tecnología clásica y dinámica, seguirán desempeñando un papel importante en las futuras olas tecnológicas, proporcionando infinitas posibilidades para dispositivos electrónicos de alto rendimiento y aplicaciones interdisciplinarias.



Capítulo 1: Descripción general de los cátodos de tungsteno con bario

Como material de emisión termoiónica altamente eficiente, el cátodo de tungsteno de bario tiene una posición insustituible en el campo de la electrónica de vacío y la alta tecnología. Su exclusiva matriz porosa de tungsteno y su estructura impregnada de compuesto de bario le confieren las características de baja función de trabajo, alta densidad de corriente de emisión, excelente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

estabilidad térmica y larga vida útil, lo que lo convierte en un componente central de tubos de microondas, tubos de rayos X, microscopios electrónicos y otros equipos. Este capítulo tiene como objetivo proporcionar a los lectores una introducción completa a los cátodos de tungsteno de bario, cubriendo su definición y conceptos básicos, contexto de desarrollo histórico y amplia gama de campos de aplicación, sentando las bases para una discusión en profundidad en capítulos posteriores. Al comparar las diferencias de rendimiento entre los cátodos de tungsteno de bario y otros tipos de cátodos, clasificaremos los hitos clave en su evolución tecnológica y esperamos su potencial en campos tradicionales y emergentes.

1.1 Definición y concepto básico del cátodo de tungsteno de bario

1.1.1 Definición de cátodo de bario y tungsteno

El cátodo de tungsteno de bario es un cátodo basado en el principio de emisión termoiónica, y su estructura central consiste en una matriz de tungsteno porosa con alta porosidad y compuestos de bario impregnados como aluminato de calcio de bario, Ba-Ca-Aluminate. La matriz porosa de tungsteno se prepara mediante tecnología de pulvimetalurgia y tiene una estructura de poros uniforme, que puede adsorber y almacenar compuestos de bario de manera efectiva. En condiciones de funcionamiento a alta temperatura, los compuestos de bario liberan átomos de bario reactivos a través de la descomposición térmica, que se difunden a la superficie a través de los poros de la matriz porosa de tungsteno, formando una sola capa atómica con una función de trabajo baja (función de trabajo de aproximadamente 1,1-1,5 eV). Esta función de baja potencia reduce significativamente la energía requerida para el escape de electrones, lo que permite que los cátodos de bario-tungsteno proporcionen una alta densidad de corriente de emisión y funcionen bien en escenarios de alta potencia, alta frecuencia y alta confiabilidad.

El diseño de los cátodos de tungsteno de bario combina el alto punto de fusión de la matriz de tungsteno (aproximadamente 3422 ° C), la excelente estabilidad química y las ventajas de baja función de trabajo de los compuestos de bario, lo que los hace particularmente adecuados para dispositivos electrónicos de vacío que requieren una fuente de electrones estable, como tubos de microondas, tubos de rayos X e instrumentos científicos. Su resistencia al envenenamiento y su estabilidad térmica mejoran aún más su idoneidad en entornos exigentes, como escenarios de alto vacío o alta radiación.

1.1.2 Comparación del cátodo caliente y el cátodo frío

Las fuentes de emisión de electrones se dividen principalmente en dos categorías: cátodo caliente y cátodo frío, y existen diferencias significativas en sus principios de funcionamiento, características de rendimiento y escenarios de aplicación. La siguiente es una comparación detallada:

- **Cátodos térmicos (como cátodos de bario y tungsteno)**

El cátodo caliente calienta el material a alta temperatura, de modo que los electrones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

obtienen suficiente energía para superar la barrera superficial y lograr la emisión termoiónica. Entre sus principales características destacan:

- o **Alta densidad de corriente de transmisión:** Alcanzando varios amperios a decenas de amperios por centímetro cuadrado, adecuado para dispositivos de alta potencia como tubos de microondas y tubos de rayos X.
 - o **Estabilidad y proceso maduro:** Después de casi cien años de desarrollo, la tecnología de cátodos térmicos tiene procesos de fabricación maduros y consistencia de alto rendimiento, y se usa ampliamente en la industria y la investigación científica.
 - o **Larga vida útil:** Los cátodos de tungsteno de bario pueden funcionar durante miles o decenas de miles de horas en las condiciones adecuadas, cumpliendo con los requisitos de alta confiabilidad. Las limitaciones son la necesidad de calentamiento continuo, lo que resulta en un alto consumo de energía, altas temperaturas que pueden causar estrés térmico o envejecimiento del material, y altos requisitos para un entorno de vacío (generalmente 10^{-6} Pa o menos) para evitar la contaminación de la superficie.
- **Cátodos fríos (por ejemplo, cátodos de emisión de campo, cátodos de nanotubos de carbono)**

Los cátodos fríos inducen la emisión de túneles de electrones a través de fuertes campos eléctricos (generalmente 10^7 - 10^9 V/m) sin operación a alta temperatura. Entre sus principales características destacan:

- o **Bajo consumo de energía :** no requiere calefacción, adecuado para dispositivos de bajo consumo como la electrónica portátil.
- o **Respuesta rápida:** La emisión de electrones tiene un tiempo de respuesta corto (nanosegundos), lo que la hace adecuada para aplicaciones de alta frecuencia o pulsadas.
- o **Potencial de miniaturización:** Compacto y adecuado para dispositivos miniaturizados, como pantallas de emisión de campo o microfuentes de rayos X. Sin embargo, los cátodos fríos tienen una baja densidad de corriente de emisión (generalmente a nivel de mA/cm²), requisitos extremadamente altos de uniformidad del campo eléctrico y limpieza de la superficie, son susceptibles a la contaminación o al daño, y tienen un proceso de fabricación complejo y un alto costo.

La siguiente tabla resume el rendimiento de los cátodos calientes frente a los cátodos fríos (datos basados en parámetros técnicos comunes):

Característica	Cátodos térmicos (por ejemplo, cátodos de bario y tungsteno)	Cátodo frío (por ejemplo, cátodo de emisión de campo)
Cómo funciona:	Emisión termoiónica (calentada a alta temperatura)	Túnel de electrones inducido por campo (campo eléctrico fuerte)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Función de trabajo (Ev)	1.1–1.5 (cátodo de tungsteno de bario)	4–5 (típico)
Densidad de corriente de emisión	10–20 A/cm²	0,01–1 A/cm²
Temperatura de funcionamiento	900–110850°C	temperatura ambiente
Vida	Decenas de miles de horas	Miles de horas (dependiendo del entorno)
Requisitos de vacío	Alto (10 ⁻⁶ Pa o menos)	Extremadamente alto (10 ⁻⁸ Pa o menos)
Beneficios clave	Alta densidad de corriente y larga vida útil	Bajo consumo de energía, respuesta rápida
Principales limitaciones	Alto consumo de energía y alta temperatura requerida	Baja densidad de corriente y proceso complejo
Aplicaciones típicas	Tubos de microondas, tubos de rayos X	Pantalla de emisión de campo, fuente de microrayos X

Los cátodos calientes, como los cátodos de tungsteno de bario, dominan la electrónica de vacío de alta potencia y larga duración, mientras que los cátodos fríos son más adecuados para aplicaciones emergentes miniaturizadas de baja potencia. Los dos se complementan en diferentes escenarios y promueven conjuntamente el progreso de la tecnología de emisiones electrónicas.

1.1.3 Comparación de cátodos de bario y tungsteno con otros cátodos térmicos

Entre la familia de cátodos térmicos, los cátodos de tungsteno de bario son ampliamente favorecidos por sus excelentes propiedades integrales. Aquí hay una comparación con los tipos de cátodos térmicos comunes (cátodos de óxido, cátodos de tungsteno de torio, cátodos de tungsteno puro):

- Cátodo de óxido**
El cátodo de óxido está hecho de óxido de bario (BaO), óxido de estroncio (SrO) y otros materiales recubiertos en una matriz de níquel, con una función de trabajo baja (aproximadamente 1-2 eV), una temperatura de funcionamiento de 800-1000 ° C y una densidad de corriente de emisión de aproximadamente 1-5 A / cm². Su ventaja es su bajo costo y es adecuado para tubos de vacío de baja potencia (como las primeras radios). Sin embargo, tiene requisitos estrictos para entornos de vacío (menos de 10⁻⁷ Pa), es susceptible a la contaminación por oxígeno o vapor de agua, lo que reduce el rendimiento de las emisiones y, por lo general, tiene una vida útil de cientos a miles de horas. Por el contrario, los cátodos de tungsteno de bario tienen una mayor resistencia al veneno y estabilidad térmica, lo que los hace adecuados para escenarios de alta potencia y larga duración.
- Cátodo de tungsteno de torio**
El cátodo de tungsteno de torio logra una función de trabajo baja (aproximadamente 2,6 eV) al dopar óxido de torio (ThO₂) en una matriz de tungsteno, con una temperatura de funcionamiento de 1700-1900 °C y una densidad de corriente de emisión de hasta 5-10

A/cm², lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta densidad de corriente, como tubos de microondas de alta potencia. Sin embargo, la radiactividad del torio plantea riesgos potenciales para los seres humanos y el medio ambiente, lo que limita su aplicación en los campos médico y civil. Los cátodos de tungsteno de bario no tienen riesgo radiactivo, temperaturas de funcionamiento más bajas, mayor eficiencia energética y una vida útil más larga (hasta decenas de miles de horas).

- **Cátodos de tungsteno puro**

Los cátodos de tungsteno puro están hechos de alambre de tungsteno o lámina de tungsteno, tienen una función de trabajo alta (aproximadamente 4,5 eV) y requieren temperaturas extremadamente altas (2000-2500 °C) para lograr una corriente de emisión suficiente (aproximadamente 0,1-1 A / cm²). Sus ventajas son una fuerte estabilidad química y adecuado para entornos extremos (como alto vacío o alta temperatura), pero su alto consumo de energía y baja eficiencia de emisiones dificultan satisfacer las necesidades de los dispositivos modernos de alto rendimiento. La baja función de trabajo y la baja temperatura de funcionamiento de los cátodos de tungsteno de bario hacen que superen a los cátodos de tungsteno puro en todos los ámbitos en términos de eficiencia energética, rendimiento y longevidad.

El cátodo de tungsteno de bario se ha convertido en el material de cátodo térmico preferido en los dispositivos electrónicos de vacío modernos debido a sus ventajas de baja función de trabajo, alta eficiencia de emisión, larga vida útil y no radiactividad, y se usa ampliamente en escenarios de alta confiabilidad y alta potencia.

1.2 Desarrollo histórico del cátodo de tungsteno de bario

1.2.1 Origen y evolución técnica de los cátodos de bario y tungsteno

El origen de los cátodos de tungsteno de bario se remonta al auge de la tecnología de emisión termiónica a principios del siglo XX. A principios de la década de 1900, los cátodos calientes comenzaron a aplicarse a los primeros tubos de vacío, como diodos y triodos en las comunicaciones por radio. En ese momento, los cátodos de tungsteno puro se usaban ampliamente debido a su alto punto de fusión y estabilidad química, pero su alta función de trabajo (alrededor de 4,5 eV) y su alta temperatura de funcionamiento limitaban la eficiencia de emisión y la eficiencia energética. En los años 20 y 30 del siglo XX, la aparición de cátodos de óxido redujo significativamente la función de trabajo, pero su sensibilidad ambiental y sus deficiencias de corta vida llevaron a los investigadores a explorar mejores materiales de cátodos térmicos.

En la década de 1950, con el aumento de la demanda de dispositivos electrónicos de vacío como radares, comunicaciones por microondas y tubos de imagen de televisión, la investigación y el desarrollo de cátodos de baja potencia y larga duración se convirtieron en un tema candente. A fines de la década de 1950, los científicos estadounidenses propusieron por primera vez el concepto de impregnar compuestos de bario en una matriz de tungsteno porosa y desarrollaron un prototipo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temprano de un cátodo de tungsteno de bario. Este cátodo combina la alta estabilidad de la matriz de tungsteno con las características de baja función de trabajo de los compuestos de bario, mejorando significativamente el rendimiento de emisión. En la década de 1960, la tecnología de preparación de pulvimetalurgia de matriz de tungsteno porosa y el proceso de impregnación de compuestos de bario maduraron gradualmente, y los cátodos de tungsteno de bario comenzaron a aplicarse comercialmente en tubos de microondas y tubos de rayos X.

En los años 70 y 80 del siglo XX, la tecnología de cátodos de tungsteno y bario entró en un período de rápido desarrollo. La introducción de nuevos compuestos como el aluminato de bario-calcio optimiza las propiedades de emisión, y la estandarización de los procesos de activación mejora la consistencia de la producción. Desde los años 90 del siglo XX, con el avance de los experimentos aeroespaciales, de imágenes médicas y de física de alta energía, el alcance de la aplicación de los cátodos de bario y tungsteno se ha ampliado aún más. A principios del siglo XXI, la introducción de la nanotecnología, las nuevas formulaciones de compuestos de bario y los procesos de fabricación inteligentes han llevado el rendimiento y el potencial de aplicación de los cátodos de bario y tungsteno a un nuevo nivel. Estos avances tecnológicos han impulsado el desarrollo de la electrónica de vacío en la dirección de alta potencia, alta frecuencia y larga vida útil.

1.2.2 Hitos clave y avances tecnológicos

En el desarrollo de cátodos de tungsteno de bario, varios avances tecnológicos clave han desempeñado un papel decisivo en la mejora de su rendimiento y aplicaciones generalizadas:

- **Avance en la tecnología de matriz de tungsteno poroso (1950-1960)**

Los avances en la tecnología de pulvimetalurgia han hecho posible preparar matrices de tungsteno de alta porosidad. La estructura porosa aumenta la capacidad de almacenamiento de compuestos de bario a través de la acción capilar y promueve la difusión de bario reactivo a la superficie, mejorando así la eficiencia y estabilidad de las emisiones. Este avance sentó las bases para la comercialización de cátodos de bario y tungsteno.

- **Optimización de la formulación de compuestos de bario (década de 1970)**

El aluminato de calcio de bario (p. ej., $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) se convirtió en un avance clave en los cátodos de bario y tungsteno. Este compuesto se descompone lentamente a altas temperaturas y es capaz de liberar continuamente bario reactivo, lo que garantiza una larga vida útil del cátodo (decenas de miles de horas) y una emisión estable (densidad de corriente de 10-20 A/cm²). La fórmula optimizada también mejora la resistencia al envenenamiento y reduce el impacto de la contaminación de la superficie.

- **Estandarización de los procesos de impregnación y activación (década de 1980)**

El control de los parámetros de impregnación (por ejemplo, concentración de solución, tiempo de impregnación, temperatura) y el proceso de activación del tratamiento térmico mejoraron significativamente la uniformidad de la capa activa y la consistencia de las propiedades de emisión. Este proceso estandarizado ha promovido la producción industrial

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de cátodos de tungsteno de bario, haciéndolos más utilizados en tubos de microondas, tubos de rayos X y otros campos.

- **Introducción de la nanotecnología (década de 2000 hasta el presente)**

La exploración de la matriz de tungsteno porosa a nanoescala y la tecnología de recubrimiento de nanobario ha mejorado aún más el rendimiento de las emisiones. La estructura de nanoporos aumenta el área de superficie y mejora la eficiencia de difusión de los átomos de bario. Las nuevas técnicas de dopaje, como la adición de elementos de tierras raras como el lantano o el cerio, optimizan la función de trabajo y la estabilidad térmica. Estas tecnologías permiten que los cátodos de tungsteno de bario muestren potencial en aplicaciones emergentes como los generadores de ondas de terahercios.

- **Fabricación y pruebas inteligentes (desde la década de 2010 hasta el presente)**

La fabricación moderna ha introducido equipos de impregnación automatizados y tecnología de monitoreo en tiempo real para garantizar la precisión del proceso de producción. Los métodos de prueba avanzados (por ejemplo, análisis de microscopía electrónica de barrido, medición de densidad de corriente de emisión) mejoran el control de calidad y reducen las desviaciones de rendimiento en la producción.

Estos avances tecnológicos no solo han mejorado el rendimiento de los cátodos de tungsteno de bario, sino que también han promovido la aplicación generalizada de dispositivos electrónicos de vacío en los campos del radar, las comunicaciones, la investigación médica y científica.

1.3 Campos de aplicación de los cátodos de bario y tungsteno

1.3.1 Electrónica de vacío

La alta densidad de corriente de emisión, la larga vida útil y la excelente estabilidad de los cátodos de bario-tungsteno los convierten en los componentes centrales de una variedad de dispositivos electrónicos de vacío, que incluyen:

- **Tubos de microondas**

Los tubos de microondas son dispositivos electrónicos de alta frecuencia y alta potencia ampliamente utilizados en radares, comunicaciones y calefacción industrial. Los cátodos de tungsteno de bario juegan un papel clave en los siguientes tubos de microondas:

- o **Magnetron:** Utilizado en radares militares y civiles (por ejemplo, radares meteorológicos, radares de control de tráfico aéreo) y equipos de calentamiento por microondas (por ejemplo, hornos de microondas industriales), su alta densidad de corriente ($10\text{-}20\text{ A / cm}^2$) admite una salida de alta potencia estable (hasta el nivel de megavatios).
- o **Tubo de onda viajera:** se utiliza para la comunicación por satélite, el amplificador de la estación base terrestre y la transmisión de alta frecuencia, proporcionando amplificación de señal de banda ancha y alta ganancia para cumplir con los requisitos de alta frecuencia de los sistemas de comunicación modernos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Tubo Klystron** : utilizado para radares de alta potencia (como sistemas de guía de misiles) y aceleradores de partículas (como fuentes de radiación de sincrotrón), que admiten alta potencia de pulso (cientos de kilovatios a megavatios). La alta estabilidad y la resistencia al envejecimiento de los cátodos de bario-tungsteno garantizan un funcionamiento fiable de estos dispositivos en entornos exigentes de alta frecuencia.
- **Tubos de rayos X**

Los tubos de rayos X son los componentes centrales de las imágenes médicas y las pruebas industriales no destructivas. Los cátodos de tungsteno de bario proporcionan un haz de electrones estable y de alto brillo que admite las siguientes aplicaciones:

 - o **Imágenes médicas:** Al igual que los escáneres de TC y los instrumentos de diagnóstico por rayos X, su alta eficiencia de emisión admite imágenes de alta resolución (resolución hasta un nivel submilimétrico) y un escaneo rápido (resolución de segundo nivel), lo que mejora la precisión del diagnóstico y la experiencia del paciente.
 - o **Pruebas industriales no destructivas:** se utiliza para detectar grietas, calidad de soldadura y corrosión de tuberías de componentes de aviación para garantizar la seguridad industrial y la calidad del producto. La larga vida útil (decenas de miles de horas) y la consistencia de los cátodos de tungsteno de bario reducen los costos de mantenimiento del equipo y mejoran la eficiencia operativa.
- **Otros dispositivos de vacío**

Los cátodos de tungsteno de bario también se utilizan en tubos fotomultiplicadores (para la detección de luz de alta sensibilidad, como observaciones astronómicas y experimentos de física nuclear), equipos de soldadura por haz de electrones (para la fabricación de precisión de componentes aeroespaciales) e interruptores de vacío (para el control electrónico de sistemas de energía de alto voltaje). Su alto rendimiento cumple con los estrictos requisitos de estos dispositivos para fuentes electrónicas.

1.3.2 Usos específicos en la industria y la investigación científica

Los cátodos de tungsteno de bario tienen una amplia gama de aplicaciones en la producción industrial y la investigación científica, que incluyen:

- **Microscopía electrónica**

En la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM), los cátodos de bario-tungsteno proporcionan un haz de electrones estable y de alto brillo que admite la topografía de la superficie de resolución a nanoescala y el análisis de la estructura interna. Su alta densidad de corriente de emisión y sus características de bajo ruido lo hacen adecuado para la ciencia de los materiales (por ejemplo, el análisis de materiales semiconductores), la biología (por ejemplo, la obtención de imágenes de estructuras celulares) y la investigación en nanotecnología.
- **Espectrómetro**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Como componente clave de una fuente de iones de alta sensibilidad, el cátodo de tungsteno de bario desempeña un papel importante en el monitoreo ambiental (como la detección de compuestos orgánicos volátiles en el aire), el desarrollo de fármacos (como la identificación de metabolitos) y la investigación geológica (como el análisis de la relación de isótopos). Su alta eficiencia de emisión mejora la sensibilidad de detección del espectrómetro de masas (hasta el nivel de ppb).

- **Equipo de análisis de superficies**

- En el espectrómetro de electrones de barrena (AES), el espectrómetro de fotoelectrones de rayos X (XPS) y el espectrómetro de masas de iones secundarios (SIMS), el cátodo de tungsteno de bario proporciona un flujo de electrones estable para un análisis preciso de la composición química y la estructura electrónica de la superficie del material. Estas tecnologías se utilizan ampliamente en el desarrollo de nuevos materiales (como aleaciones de alto rendimiento, películas semiconductoras) e ingeniería de superficies (como la optimización del rendimiento del recubrimiento).

- **Sistemas de radar y comunicación**

Los cátodos de tungsteno de bario proporcionan fuentes de electrones de alta potencia en radares militares (como sistemas de guía de misiles), radares civiles (como control de tráfico aéreo) y equipos de comunicación (como amplificadores satelitales, estaciones base 5G), que admiten la transmisión de señales a larga distancia y capacidades antiinterferentes. Su alta fiabilidad y larga vida útil reducen los costes de mantenimiento del sistema y cumplen con los requisitos de alto rendimiento de los sistemas de comunicación modernos.

- **Calentamiento y procesamiento industrial**

En la fusión por haz de electrones, la modificación de la superficie del haz de electrones y los equipos de tratamiento térmico al vacío, los cátodos de tungsteno de bario proporcionan haces de electrones de alta energía para la purificación de metales (por ejemplo, producción de aleaciones de titanio), preparación de aleaciones y endurecimiento de la caja (por ejemplo, álabes de turbinas de aviación), mejorando significativamente las propiedades del material y la eficiencia industrial.

1.3.3 Potencial entre dominios

Con el rápido desarrollo de la ciencia y la tecnología, el potencial de aplicación de los cátodos de tungsteno de bario se está expandiendo a campos emergentes e interdisciplinarios, mostrando perspectivas prometedoras:

- **Tecnología de nuevas energías**

En los propulsores iónicos, el cátodo de tungsteno de bario sirve como fuente de electrones de alta corriente para apoyar el desarrollo de sistemas de microempuje de naves espaciales. Los propulsores iónicos son fuentes de energía ideales para la exploración del espacio profundo (por ejemplo, el rover de Marte, misiones interestelares) con su alto impulso específico (hasta 3000-9000 segundos) y su bajo consumo de combustible. La alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estabilidad y la larga vida útil de los cátodos de tungsteno de bario cumplen con los exigentes requisitos del entorno espacial.

- **Tecnología de onda de terahercios**

Las ondas de terahercios (0,1-10 THz) ofrecen ventajas únicas en imágenes, comunicación y análisis espectral. El cátodo de tungsteno de bario proporciona una fuente de electrones de alta potencia en un generador de ondas de terahercios de electrones de vacío que admite imágenes de terahercios (para detección de seguridad, detección temprana de cáncer) y comunicación de alta velocidad (redes 6G de próxima generación). Su alta eficiencia de emisiones y estabilidad brindan la posibilidad de comercializar la tecnología de terahercios.

- **Experimentos de física de altas energías**

En los aceleradores de partículas (como el LHC del CERN) y las fuentes de radiación de sincrotrón, los cátodos de bario-tungsteno proporcionan una fuente de electrones de alta corriente para generar haces de partículas de alta energía y explorar las propiedades y la estructura de las partículas elementales. Su alta eficiencia de emisiones y estabilidad respaldan carreras experimentales largas y de alta intensidad.

- **Aplicaciones biomédicas**

A través del análisis de espectrometría de masas de alta precisión, los cátodos de tungsteno de bario se pueden utilizar como fuente de iones para la detección molecular en el diagnóstico de enfermedades, como el análisis de marcadores de cáncer y los estudios metabolómicos. Su alta sensibilidad y fiabilidad han impulsado el desarrollo de la medicina de precisión. Además, la aplicación de cátodo de tungsteno de bario en equipos de esterilización por haz de electrones proporciona una solución eficiente para la esterilización de dispositivos médicos.

- **Tecnología cuántica**

Se está explorando la posible aplicación de los cátodos de bario y tungsteno en la computación cuántica y los equipos de comunicación cuántica. Sus características de alta estabilidad y baja función de trabajo se pueden utilizar para desarrollar fuentes de electrones de alta precisión para respaldar la manipulación de bits cuánticos y la detección de estados cuánticos. La investigación interdisciplinaria (como la combinación de materiales cuánticos y tecnología electrónica de vacío) puede traer nuevos avances en la tecnología cuántica.

- **Energía verde y protección del medio ambiente**

La aplicación de cátodo de tungsteno de bario en generadores de plasma respalda técnicas eficientes de tratamiento de gases de escape y purificación de agua, como la degradación por plasma de contaminantes orgánicos mediante la inducción por haz de electrones. Además, sus aplicaciones potenciales en la investigación de la fusión nuclear, como los sistemas de calentamiento por haz de electrones para dispositivos tokamak, brindan posibilidades para el desarrollo de energía limpia.

En resumen, los cátodos de bario-tungsteno, con su excelente rendimiento y amplia adaptabilidad, no solo ocupan una posición central en los dispositivos electrónicos de vacío tradicionales, sino que también muestran un gran potencial en campos emergentes como las nuevas energías, la tecnología

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de terahercios, la tecnología cuántica y la biomedicina. Este capítulo proporciona a los lectores un marco claro de conocimiento a través de la definición de cátodos de tungsteno de bario, comparaciones con otros cátodos, desarrollos históricos e introducciones completas a los campos de aplicación. Los capítulos posteriores profundizarán en su ciencia de materiales, principios de funcionamiento, procesos de fabricación y estrategias de optimización del rendimiento, brindando a los lectores una perspectiva técnica más completa y profunda.



Capítulo 2: Ciencia de los materiales de los cátodos de tungsteno de bario

La excelencia de los cátodos de tungsteno de bario se debe a su meticulosa composición de materiales, procesos de preparación precisos y la interacción entre la microestructura compleja y el rendimiento. Como material de emisión termoiónica eficiente, el efecto sinérgico de la matriz porosa de tungsteno del cátodo de tungsteno de bario y el compuesto de bario logra una función de trabajo baja, una alta densidad de corriente de emisión y una excelente estabilidad térmica, lo que lo convierte en una posición central en los dispositivos electrónicos de vacío. Este capítulo profundiza en la base de la ciencia de los materiales de los cátodos de tungsteno de bario, analiza en detalle el impacto de su composición material, proceso de preparación y microestructura en el rendimiento, cubriendo las propiedades químicas y físicas de las matrices de tungsteno porosas, la optimización de las proporciones de compuestos de bario, el papel de los aditivos, las tecnologías clave en el proceso de preparación y la relación entre la microestructura y las propiedades de emisión.

2.1 Composición del material del cátodo de bario y tungsteno

2.1.1 Propiedades químicas y físicas de la matriz de tungsteno porosa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La matriz porosa de tungsteno es la estructura central del cátodo de tungsteno de bario, y sus propiedades químicas y físicas determinan directamente la estabilidad térmica, la resistencia mecánica y la eficiencia de emisión de electrones del cátodo. La matriz porosa de tungsteno se prepara mediante tecnología de pulvimetalurgia utilizando tungsteno de alta pureza (pureza $\geq 99,95\%$), con porosidad y tamaño de poro adecuados. Esta estructura porosa no solo proporciona espacio para el almacenamiento de compuestos de bario, sino que también facilita la difusión de átomos de bario activos a través de la acción capilar, lo que resulta en la formación de una capa de baja función de trabajo en la superficie del cátodo. Las siguientes son las principales propiedades químicas y físicas de la matriz de tungsteno porosa:

- **Estabilidad química:** La alta inercia química del tungsteno lo hace altamente resistente al oxígeno, al vapor de agua y a los gases residuales en entornos de alto vacío (10^{-6} Pa o menos). Esta estabilidad reduce eficazmente el riesgo de oxidación o envenenamiento de la superficie y prolonga la vida útil del cátodo. Además, el tungsteno tiene una baja reactividad química a los compuestos de bario, evitando interacciones adversas entre la matriz y la sustancia activa.
- **Propiedades físicas:** El alto punto de fusión del tungsteno (aproximadamente 3422°C) le permite soportar las temperaturas de funcionamiento típicas ($900-1100^{\circ}\text{C}$) de los cátodos de bario-tungsteno sin degradación estructural ni deformación. La alta densidad (aproximadamente $19,25\text{ g/cm}^3$) y la alta resistencia mecánica (resistencia a la tracción de aproximadamente $700-1000\text{ MPa}$) garantizan la estabilidad de la matriz en entornos de alta temperatura y alta tensión. La acción capilar de la estructura porosa mejora la capacidad de adsorción de los compuestos de bario, y la red de poros proporciona un canal eficiente para la difusión de átomos de bario activos a la superficie.
- **Conductividad térmica y eléctrica:** La alta conductividad térmica del tungsteno (aproximadamente $173\text{ W/m}\cdot\text{K}$) garantiza una distribución uniforme del calor durante el proceso de trabajo, reduciendo la degradación del material causada por el sobrecalentamiento local. La alta conductividad (aproximadamente $1,82 \times 10^7\text{ S/m}$) permite una transmisión electrónica eficiente, lo que la hace adecuada para las necesidades de los dispositivos electrónicos de alta potencia.
- **Propiedades de los poros:** La porosidad y la distribución del tamaño de los poros son parámetros clave para la matriz porosa de tungsteno. La porosidad del 20-30% equilibra la capacidad de almacenamiento y la resistencia mecánica de los compuestos de bario, y el rango de tamaño de poro de $1-10\text{ }\mu\text{m}$ garantiza la eficacia de la acción capilar. Los poros deben formar una red conectada para soportar la difusión continua de átomos de bario.

La porosidad y la distribución del tamaño de los poros de la matriz de tungsteno porosa deben controlarse mediante un proceso de preparación preciso, una porosidad demasiado alta puede conducir a una resistencia mecánica insuficiente y una porosidad demasiado baja limitará la eficiencia de almacenamiento y difusión de los compuestos de bario y afectará el rendimiento de la emisión. La microestructura de la matriz generalmente se analiza mediante microscopía electrónica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de barrido (SEM) o tomografía de rayos X (X-CT) para garantizar la uniformidad y consistencia de los poros.

2.1.2 Propiedades y proporciones de los compuestos de bario (como el aluminato de calcio de bario)

Los compuestos de bario son los componentes clave del cátodo de tungsteno de bario para lograr una baja función de trabajo y una alta eficiencia de emisión, y los compuestos de bario comúnmente utilizados son el aluminato de calcio de bario (como $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, abreviado como proporción 4:1:1). Estos compuestos liberan átomos de bario libres por descomposición térmica a altas temperaturas (900-1100 °C) y se difunden a la superficie de la matriz porosa de tungsteno, formando una capa de baja función de trabajo (función de trabajo de aproximadamente 1,1-1,5 eV), lo que reduce significativamente la energía requerida para el escape de electrones. Las siguientes son las propiedades clave y la optimización de la proporción de compuestos de bario:

- Propiedades químicas:** El aluminato de bario-calcio se descompone a altas temperaturas a través de las siguientes reacciones:

$$4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Ba} + \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{O}_2$$

Los átomos de bario libres liberados se adsorben en la superficie de la matriz de tungsteno, formando una sola capa atómica o película delgada, lo que reduce la función de trabajo. Los subproductos generados (por ejemplo, CaO , Al_2O_3) tienen una alta estabilidad química y no interfieren con el rendimiento de las emisiones. La tasa de descomposición del compuesto debe ser moderada para garantizar un suministro continuo de bario durante el funcionamiento a largo plazo y evitar la pérdida activa de capas debido a una evaporación excesiva.
- Propiedades físicas:** El punto de fusión del aluminato de calcio de bario es más alto que la temperatura de funcionamiento del cátodo, lo que evita la fusión prematura o la volatilización. El tamaño de partícula del compuesto debe coincidir con el tamaño de poro de la matriz de tungsteno para garantizar una impregnación uniforme y una difusión eficiente. El coeficiente de expansión térmica del compuesto es diferente al de la matriz de tungsteno, y el estrés térmico debe reducirse mediante la optimización del proceso.
- Optimización de la relación:** relación 4:1:1 ($4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) es estándar en aplicaciones industriales porque equilibra la tasa de liberación de bario, la estabilidad química y la resistencia a la toxicidad. Otras configuraciones incluyen 5:3:2 ($5\text{BaO} \cdot 3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) o 6:1:2 ($6\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) también se explora en escenarios específicos. Por ejemplo, la proporción de 5:3:2 puede mejorar la capacidad antiintoxicación y es adecuada para entornos con alto contenido de gases residuales; La relación 6:1:2 aumenta la tasa de liberación de bario, lo que es adecuado para las necesidades de alta densidad de corriente, pero puede reducir la vida útil. La selección de la relación debe optimizarse de acuerdo con el escenario de aplicación, como tubos de microondas de alta potencia o tubos de rayos X de larga duración.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Adaptabilidad ambiental:** Los compuestos de bario son sensibles al oxígeno y al vapor de agua y deben almacenarse y manipularse en un entorno de alto vacío para evitar la degradación debido a la oxidación o la hidratación.

La proporción y las características de las partículas de los compuestos de bario afectan directamente la eficiencia de formación de la capa activa y la estabilidad a largo plazo del cátodo, y deben optimizarse experimentalmente para satisfacer las necesidades de diferentes aplicaciones.

2.1.3 Efecto de los aditivos en el rendimiento de las emisiones

Con el fin de mejorar aún más la eficiencia de emisión, la estabilidad térmica y la capacidad anti-envenenamiento de los cátodos de tungsteno de bario, a menudo se introducen aditivos en compuestos de bario o matrices de tungsteno. Los siguientes son aditivos comunes y sus efectos:

- **Óxidos de tierras raras (por ejemplo, La_2O_3 , CeO_2):** Los elementos de tierras raras mejoran la eficiencia de las emisiones al reducir la función de trabajo (hasta 1,0 eV o menos) al tiempo que mejoran la estabilidad térmica de la capa activa. Por ejemplo, el dopaje con 0,5-2 % en peso de La_2O_3 reduce significativamente la función de trabajo y mejora la resistencia a la oxidación, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta potencia. El CeO_2 mejora la dureza de la superficie y reduce el desgaste mecánico.
- **Compuestos de calcio (Ca) o estroncio (Sr):** controlan la tasa de descomposición de los compuestos de bario ajustando la proporción de CaO o SrO y prolongan la vida útil del cátodo. Por ejemplo, aumentar la relación de CaO (a una relación de 2:1:1) puede ralentizar la tasa de liberación de bario, lo que es adecuado para aplicaciones de larga duración, como dispositivos de comunicación por satélite, pero puede reducir ligeramente la densidad de corriente de transmisión.
- **Aditivos metálicos (p. ej., Os, Ir):** El recubrimiento de una capa delgada de osmio (Os) o iridio (Ir) (aproximadamente 0,1-1 μm de espesor) en la superficie de la matriz de tungsteno puede mejorar la catálisis de la superficie, promoviendo la difusión de átomos de bario y la formación de capas activas. Los recubrimientos OS pueden reducir la función de trabajo a aproximadamente 1.0 eV, pero el costo es mayor y existe una compensación entre la economía.
- **Aditivos de silicato o borato:** Mejoran la resistencia al envenenamiento formando una capa protectora y reducen los efectos de la contaminación por oxígeno o carbono. Sin embargo, el exceso de silicato puede aumentar la función de trabajo y es necesario controlar la proporción de adición (generalmente < 1 % en peso).
- **Otros aditivos:** como el óxido de itrio (Y_2O_3) o el circonio (ZrO_2), que mejoran la estabilidad térmica y la resistencia mecánica, adecuados para aplicaciones en entornos extremos (como la electrónica espacial).

El tipo y la proporción de aditivos deben optimizarse con precisión a través de experimentos, y la adición excesiva puede conducir a capas activas desiguales o reacciones secundarias, lo que reduce

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el rendimiento de las emisiones. La elección de aditivos debe diseñarse para escenarios de aplicación específicos, como alta densidad de corriente, larga vida útil o necesidades antiintoxicantes.

2.2 Proceso de preparación del cátodo de tungsteno de bario

2.2.1 Preparación de la matriz de tungsteno poroso: pulvimetalurgia y control de poros

La preparación de la matriz de tungsteno porosa es un paso fundamental en la fabricación de cátodos de tungsteno de bario, utilizando tecnología de pulvimetalurgia, y el proceso incluye cribado de polvo, moldeo por prensado, sinterización y control de poros. Estos son los pasos detallados:

- **Cribado de polvo de tungsteno:** Seleccione [polvo de tungsteno de alta pureza](#) (pureza $\geq 99,95\%$, tamaño de partícula de 1 a 10 μm) para garantizar la estabilidad química y la uniformidad de la matriz. La distribución del tamaño de partícula tiene un impacto directo en la estructura de los poros y debe optimizarse mediante tecnología de cribado por vibración o clasificación del flujo de aire. Los tamaños de partícula más pequeños (1-3 μm) aumentan la porosidad pero pueden reducir la resistencia mecánica; Los tamaños de partícula más grandes (5-10 μm) mejoran la resistencia pero reducen la porosidad.
- **Prensado:** El polvo de tungsteno se coloca en un molde y se presiona a alta presión (100-500 MPa) para formar espacios en blanco, generalmente cilíndricos (5-20 mm de diámetro) o láminas (1-5 mm de espesor). El proceso de prensado requiere controlar la presión, el diseño del molde y el uso de lubricantes para lograr una estructura de poros inicial uniforme. Las técnicas de prensado bidireccional o isostático mejoran la uniformidad de la densidad de palanquilla.
- **Proceso de sinterización:** La sinterización a alta temperatura (2000-2500 $^{\circ}\text{C}$) en vacío (10^{-4} - 10^{-6} Pa) o atmósfera de hidrógeno permite que las partículas de tungsteno se combinen a través de la difusión para formar una estructura porosa. El tiempo de sinterización (1-4 horas) y la temperatura deben controlarse con precisión, una temperatura demasiado alta puede provocar el colapso de los poros y una temperatura demasiado baja afectará la fuerza de unión de las partículas. La atmósfera de hidrógeno reduce las impurezas de óxido y mejora la pureza de la matriz.
- **Control de porosidad:** Controle la porosidad y el tamaño de los poros agregando rellenos temporales (por ejemplo, almidón, polimetilmetacrilato) o ajustando la distribución del tamaño de partícula del polvo de tungsteno. El relleno se volatiliza durante el proceso de sinterización, creando una red de poros uniforme. Las pruebas de porosidad muestran que una porosidad del 20-30% equilibra la resistencia mecánica con la capacidad de almacenamiento de compuestos de bario.

La calidad de la matriz porosa de tungsteno afecta directamente el proceso de impregnación posterior y el rendimiento del cátodo, y la consistencia de la estructura de los poros debe verificarse mediante SEM, X-CT o análisis de área superficial específica (BET). La matriz optimizada debe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tener una distribución uniforme de poros, alta resistencia mecánica (resistencia a la compresión >500 MPa) y un tamaño de poro adecuado (1-10 μm).

2.2.3 Proceso de impregnación de compuestos de bario: preparación de la solución y parámetros de impregnación

El proceso de impregnación de compuestos de bario es un paso clave en la introducción uniforme de compuestos de bario en sustratos porosos de tungsteno, lo que afecta directamente la eficiencia de formación y las propiedades de emisión de la capa activa. El proceso incluye la preparación de la solución, la impregnación, el secado y el tratamiento térmico de la siguiente manera:

- **Preparación de la solución:** aluminato de calcio de bario (como $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) se mezcla con agua desionizada o un disolvente orgánico como el etanol para formar una suspensión o solución. La viscosidad y la dispersión de partículas de la solución deben optimizarse mediante agitación o sonicación para garantizar una penetración uniforme en los poros. Agregar una pequeña cantidad de tensioactivo, como alcohol polivinílico, mejora la humectabilidad de la solución.
- **Proceso de impregnación:** La matriz porosa de tungsteno se sumerge en una solución compuesta de bario, utilizando técnicas de impregnación al vacío (10^{-2} - 10^{-4} Pa) o impregnación a presión (0,1-1 MPa) para facilitar la penetración de la solución en los poros. La impregnación al vacío elimina el aire de los poros y mejora la eficiencia del llenado; La impregnación a presión mejora la profundidad de penetración de la solución. Las condiciones como la temperatura y el tiempo de impregnación deben optimizarse de acuerdo con la porosidad de la matriz y la concentración de la solución, y un tiempo de remojo demasiado largo puede provocar la obstrucción de los poros.
- **Secado y tratamiento térmico:** El sustrato impregnado se seca a bajas temperaturas (100-300 $^{\circ}\text{C}$) para eliminar los disolventes y evitar daños en la estructura de los poros. A esto le sigue un tratamiento térmico a alta temperatura (1000-1200 $^{\circ}\text{C}$) en un vacío o atmósfera inerte para curar el compuesto de bario y formar una capa activa inicial. El tratamiento térmico debe calentarse paso a paso para evitar que el estrés térmico provoque el agrietamiento de la matriz.

Los parámetros del proceso de impregnación tienen un impacto significativo en la uniformidad y las propiedades de emisión de la capa activa. Por ejemplo, una concentración de solución demasiado alta puede conducir a la acumulación de compuestos de bario en la superficie, reduciendo la uniformidad de la emisión; Las temperaturas de tratamiento térmico demasiado altas pueden acelerar la evaporación del bario y acortar su vida útil. La optimización del proceso requiere una validación experimental (por ejemplo, observación SEM o pruebas de emisiones) para garantizar una distribución uniforme de los compuestos de bario y las capas activas estables.

2.3 Microestructura y propiedades de los cátodos de bario y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.1 Análisis de porosidad y estructura de la matriz de tungsteno porosa

La microestructura de la matriz de tungsteno porosa es la base del rendimiento catódico del tungsteno de bario, y su porosidad, distribución del tamaño de los poros y conectividad afectan directamente las propiedades de almacenamiento, difusión y emisión de los compuestos de bario. Las siguientes son las características estructurales clave y los métodos de análisis:

- **Porosidad:** La porosidad típica se controla al 20-30% para equilibrar la capacidad de almacenamiento del compuesto de bario con su resistencia mecánica. La alta porosidad puede conducir a una resistencia insuficiente de la matriz y una fácil deformación a altas temperaturas. Si es demasiado bajo, la tasa de liberación de bario se limitará y la densidad de corriente de transmisión se reducirá. La intrusión de mercurio o la adsorción de gas (BET) se usa comúnmente para medir con precisión la porosidad.
- **Estructura de los poros:** Los poros deben formar una red tridimensional para garantizar una difusión eficiente de los átomos de bario a la superficie a través de la acción capilar. La distribución del tamaño de poro debe ser uniforme, un tamaño de poro demasiado grande puede conducir a una distribución desigual de los compuestos de bario y un tamaño de poro demasiado pequeño limitará la eficiencia de difusión. La tomografía de rayos X (X-TAC) reconstruye la estructura tridimensional de los poros y verifica la conectividad.
- **Análisis estructural:** La microscopía electrónica de barrido (SEM) se utiliza para observar la morfología de los poros y las propiedades de la superficie, y el análisis de área de superficie específica (BET) se utiliza para medir el área de la superficie de los poros. La espectroscopia de dispersión de energía (EDS) analiza la distribución de impurezas en matrices de tungsteno para garantizar una alta pureza. La uniformidad y la conectividad de la estructura de poros son fundamentales para la estabilidad a largo plazo del cátodo.

La optimización de la estructura de los poros debe lograrse ajustando el tamaño de partícula, la presión de prensado y los parámetros de sinterización del polvo de tungsteno. Los resultados del análisis estructural deben combinarse con la prueba de rendimiento de emisiones para verificar el efecto del diseño de poros.

2.3.2 Relación entre la morfología de la superficie y el comportamiento de emisión de la capa activa de bario

La capa activa de bario es el núcleo del rendimiento de emisión del cátodo de tungsteno de bario, y la morfología de su superficie determina directamente la función de trabajo, la densidad de la corriente de emisión y la uniformidad de la emisión. Las siguientes son las características clave y cómo se relacionan con el rendimiento:

- **Morfología de la superficie:** La capa activa consiste en una sola capa atómica o película delgada formada por átomos de bario y sus óxidos en la superficie de una matriz de tungsteno. La capa activa ideal debe ser uniforme, continua con baja rugosidad superficial

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para garantizar la uniformidad de la emisión de electrones y características de bajo ruido. La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía de fuerza atómica (AFM) se utilizan comúnmente para analizar la topografía de la superficie y verificar la planitud y la cobertura de las capas activas.

- **Función de trabajo:** La formación de la capa activa reduce la función de trabajo de 4,5 eV a 1,1-1,5 eV para tungsteno puro, lo que aumenta significativamente la densidad de corriente de transmisión. La uniformidad de la función de trabajo depende de la velocidad de difusión y la cobertura superficial de los átomos de bario, y una cobertura insuficiente (<80%) puede conducir a regiones locales de alta función de trabajo, reduciendo la eficiencia de emisión.
- **Rendimiento de emisión:** La capa activa uniforme permite una alta densidad de corriente de transmisión y una baja emisión de ruido, satisfaciendo las necesidades de tubos de microondas de alta potencia o tubos de rayos X. Los defectos superficiales (por ejemplo, grietas, acumulación de partículas) pueden desencadenar arcos localizados o emisiones desiguales, lo que reduce el rendimiento. El rendimiento de emisión generalmente se evalúa mediante pruebas de emisión termoiónica.
- **Factores que influyen:** El rendimiento de la capa activa se ve afectado por los siguientes factores:
 - o **Temperatura de funcionamiento:** La temperatura excesiva acelera la evaporación del bario, lo que resulta en la pérdida de la capa activa y acorta la vida útil. Una temperatura demasiado baja limita la difusión del bario y reduce la eficiencia de emisión.
 - o **Entorno de vacío:** El bajo vacío ($>10^{-6}$ Pa) puede causar oxidación o contaminación de la superficie, lo que aumenta la función de trabajo.
 - o **Contaminación de la superficie:** Los compuestos de oxígeno, vapor de agua o carbono pueden reaccionar con el bario para formar compuestos de alta función de trabajo (como BaO_2), lo que reduce el rendimiento de las emisiones.
 - o **Proceso de tratamiento térmico:** La activación paso a paso crea una capa activa uniforme, optimizando el rendimiento de las emisiones.

Al optimizar el proceso de impregnación, los parámetros de tratamiento térmico y la formulación de aditivos, se puede formar una capa activa uniforme y estable, mejorando el rendimiento de emisión y la vida útil de los cátodos de tungsteno de bario. La correlación entre la topografía de la superficie y el rendimiento de las emisiones debe analizarse exhaustivamente mediante SEM, AFM y pruebas de emisiones para guiar la mejora del proceso.

En resumen, la ciencia de los materiales de los cátodos de bario-tungsteno implica la compleja interacción de matrices porosas de tungsteno, compuestos de bario y aditivos, y su proceso de preparación y microestructura tienen un impacto decisivo en el rendimiento y la vida útil de las emisiones. A través de un análisis exhaustivo de la composición del material, el proceso de preparación y la microestructura, este capítulo sienta una base sólida para la discusión posterior de los principios de funcionamiento, la tecnología de fabricación y la optimización del rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Capítulo 3: Principio de funcionamiento y mecanismo de lanzamiento

Como material de emisión termoiónica altamente eficiente, el cátodo de tungsteno de bario se deriva de su principio de funcionamiento y mecanismo de emisión únicos. Este capítulo profundiza en la teoría de la emisión termoiónica, las características de emisión y varios factores que influyen en el rendimiento de los cátodos de tungsteno de bario. Basado en el principio básico de la emisión termoiónica, combinado con la ecuación de Richardson-Dushman, el efecto Schottky y la perspectiva de la mecánica cuántica, este artículo analiza el mecanismo de formación de la función de trabajo baja del cátodo de tungsteno de bario, el comportamiento dinámico de la capa activa y su estabilidad térmica, y elabora los efectos del entorno de trabajo, el envejecimiento y los efectos del envenenamiento. y modo de falla en el rendimiento de las emisiones.

3.1 Teoría de la emisión termoiónica

La emisión termoiónica es el principio de funcionamiento básico del cátodo de tungsteno de bario, que se refiere al proceso de calentar el material para obtener suficiente energía para que los electrones superen la barrera de la superficie y escapen al vacío. Esta sección analiza el mecanismo de emisión del cátodo de tungsteno de bario desde la perspectiva de la teoría clásica de emisiones termoiónicas, combinado con la ecuación de Richardson-Dushman, el efecto Schottky y la mecánica cuántica.

3.1.1 Ecuación de Richardson-Dushman

La ecuación de Richardson-Dushman es un modelo teórico básico que describe la emisión termoiónica, que expresa la relación entre la densidad de corriente de emisión y la temperatura y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

función de trabajo. Para un cátodo de tungsteno de bario, su densidad de corriente de emisión (J) puede describirse mediante la siguiente ecuación:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

Allí:

- (J): Densidad de corriente de emisión (unidad: A / cm²);
- (A): Constante de Richardson (valor teórico es 120,4 A/cm²· K², el valor real varía según las propiedades de la superficie del material, generalmente 50-100 A/cm²· K²);
- (T): Temperatura absoluta (unidad: K, la temperatura de funcionamiento típica del cátodo de tungsteno de bario es de 1173 a 1373 K, es decir, 900 a 1100 °C);
- (exp): función exponencial.
- (φ): función de trabajo (unidad: eV, el cátodo de tungsteno de bario es de aproximadamente 1,1-1,5 eV);
- (k): Constante de Boltzmann (8.617×10⁻⁵ eV/K).

En los cátodos de bario-tungsteno, la función de trabajo bajo (1,1-1,5 eV) aumenta significativamente el término exponencial, lo que da como resultado una densidad de corriente de emisión de 10-20 A/cm² a temperaturas más bajas, mucho más alta que la de los cátodos de tungsteno puro (alrededor de 4,5 eV y densidad de corriente de aproximadamente 0,1-1 A/cm²). El valor real de la constante de Richardson se ve afectado por el estado de la superficie, la cobertura de la capa activa de bario y la microestructura, y debe medirse experimentalmente, como el uso de equipos de prueba de emisión termoiónica en un entorno de alto vacío. La aplicación de ecuaciones tiene en cuenta las condiciones reales de funcionamiento, como la uniformidad de la temperatura y el entorno de vacío, para garantizar la precisión de la predicción.

3.1.2 Efecto Schottky y emisión mejorada en campo

El efecto Schottky se refiere al fenómeno de que la barrera superficial del material se reduce bajo la acción de un campo eléctrico externo, lo que resulta en la mejora de la emisión termoiónica. En los cátodos de tungsteno de bario, el efecto Schottky se describe mediante la siguiente función de trabajo modificada:

$$\phi_{\text{eff}} = \phi - \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}}$$

Allí:

- (φ_{eff}): la función de trabajo efectiva (unidad: eV), que representa la función de trabajo después de haber sido reducida bajo la acción de un campo eléctrico aplicado;
- (φ): Función de trabajo original (unidad: eV);
- e): potencia electrónica (1,602×10⁻¹⁹ C);
- (E): Intensidad de campo eléctrico aplicada (unidad: V/m);
- (ε₀): Constante dieléctrica de vacío (8,854×10⁻¹² F/m).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En condiciones de alto campo eléctrico (por ejemplo, 10^7 – 10^8 V/m, que se encuentran comúnmente en tubos de microondas o tubos de rayos X), la reducción de la función de trabajo puede aumentar significativamente la densidad de corriente transmitida. El efecto Schottky es particularmente importante para dispositivos de alta potencia, ya que permite una salida de corriente alta a temperaturas más bajas, lo que reduce el consumo de energía y el estrés térmico. En aplicaciones prácticas, la uniformidad del campo eléctrico debe optimizarse mediante el diseño de electrodos (como el uso de electrodos circulares lisos) para evitar arcos causados por campos eléctricos locales excesivos y daños en la superficie del cátodo.

3.1.3 Perspectiva de la mecánica cuántica

En condiciones extremas o de alta intensidad de campo, los efectos de la mecánica cuántica (como el efecto túnel) tienen un cierto impacto en el comportamiento de emisión de los cátodos de tungsteno de bario. El efecto túnel se refiere al escape de electrones en el vacío a través del túnel cuántico sin superar completamente la barrera de la superficie. La probabilidad del efecto túnel se describe mediante la ecuación de Fowler-Nordheim:

$$J = \frac{A'E^2}{\phi} \exp\left(-\frac{B\phi^{3/2}}{E}\right)$$

Allí:

- (J): densidad de corriente de túnel (unidad: A / cm²), que representa la intensidad del flujo de electrones por unidad de área;
- (A'), (B): constante (relacionada con el material y la geometría, los valores típicos son $1,54 \times 10^{-6}$ A·eV/V² y $6,83 \times 10^9$ V/m·eV^{-3/2});
- (E): Intensidad de campo eléctrico (unidad: V/m);
- (φ): Función de trabajo (unidad: eV).

En los cátodos de bario-tungsteno, los efectos de túnel suelen ser significativos en campos eléctricos muy altos, como en dispositivos de microondas mejorados en campo o generadores de ondas de terahercios. La función de trabajo bajo reduce la barrera de tunelización y mejora la probabilidad de tunelización. Sin embargo, dado que el cátodo de tungsteno de bario se basa principalmente en la emisión termoiónica, el efecto túnel tiene una pequeña contribución y debe considerarse solo en escenarios específicos de alta intensidad de campo. La perspectiva de la mecánica cuántica complementa la comprensión de los mecanismos de emisión complejos y ayuda a optimizar el diseño del cátodo, como mejorar el efecto de mejora local del campo eléctrico ajustando la topografía de la superficie (por ejemplo, protuberancias a nanoescala).

3.2 Características de emisión de los cátodos de bario y tungsteno

3.2.1 Mecanismo de formación de la función de baja potencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La función de bajo trabajo (1,1-1,5 eV) del cátodo de bario-tungsteno es el núcleo de su alta eficiencia de emisión, que se debe a la difusión y la acción superficial de los átomos de bario en la matriz porosa de tungsteno. A continuación se presenta un análisis detallado del mecanismo de formación:

- **Difusión de átomos de bario:** A temperatura de funcionamiento, el aluminato de calcio de bario (por ejemplo, $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) libera átomos de bario libres a través de una reacción de descomposición térmica:



- estos átomos se difunden a la superficie a través de una red de poros de matriz de tungsteno porosa, con un coeficiente de difusión de aproximadamente 10^{-12} – 10^{-10} m²/s, que es suficiente para formar una cubierta superficial uniforme en segundos. La conectividad de los poros y la porosidad (20-30%) son fundamentales para la eficiencia de la difusión y deben optimizarse mediante procesos de pulvimetalurgia.
- **Acción superficial:** Los átomos de bario se adsorben en la superficie de la matriz de tungsteno para formar una sola capa atómica o película delgada. La baja electronegatividad del bario y la alta electronegatividad del tungsteno forman una capa dipolar superficial, que reduce la barrera superficial y reduce la función de trabajo de 4,5 eV a 1,1-1,5 eV de tungsteno. La cobertura de la superficie debe alcanzar más del 80% para garantizar la uniformidad de la función de trabajo, por debajo de la cual puede conducir a regiones locales de alta función de trabajo y reducir la eficiencia de emisiones.
 - **Adsorción química y física:** Los átomos de bario forman fuertes enlaces con la superficie del tungsteno a través de la adsorción química para mejorar la estabilidad de la capa activa. Los átomos de bario adsorbidos físicamente proporcionan una reposición continua de bario para mantener el equilibrio dinámico. La estabilidad de la quimisorción garantiza la fiabilidad a largo plazo de la capa activa a altas temperaturas.

La formación de la función de trabajo bajo depende de la tasa de descomposición de los compuestos de bario, la eficiencia de difusión de la estructura de los poros y la uniformidad de la morfología de la superficie. La optimización de estos factores da como resultado una alta densidad de corriente estable y una baja emisión de ruido, lo que los hace adecuados para la electrónica de vacío de alta potencia, como los tubos de microondas y los tubos de rayos X.

3.2.2 Comportamiento dinámico y estabilidad térmica de las capas activas

El comportamiento dinámico y la estabilidad térmica de la capa activa de bario afectan directamente el rendimiento y la vida útil del cátodo. Estas son las características clave:

- **Comportamiento dinámico:** La capa activa está en equilibrio dinámico durante la operación, con átomos de bario que se difunden continuamente desde los poros a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficie, mientras que algunos átomos de bario se pierden debido a la evaporación. Es necesario optimizar la proporción de compuestos de bario para garantizar que la tasa de reposición coincida con la tasa de pérdida. La cobertura de la capa activa fluctúa con el tiempo y la formación inicial debe optimizarse mediante un proceso de activación paso a paso para reducir las pérdidas tempranas.

- **Estabilidad térmica:** la capa activa debe ser estable a 900-1100 °C, y la pérdida por evaporación del bario se acelera a una temperatura demasiado alta, lo que resulta en un aumento en la función de trabajo. Una temperatura demasiado baja limita la difusión del bario y reduce la eficiencia de las emisiones. La alta conductividad térmica (173 W/m·K) y el bajo coeficiente de expansión térmica ($4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) de la matriz de tungsteno garantizan que se minimice el estrés térmico y se mantenga la integridad estructural de la capa activa.
- **Topografía de la superficie:** La rugosidad de la superficie de la capa activa debe mantenerse baja para evitar regiones de función locales de alta potencia. El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM) mostró que una capa activa uniforme redujo el ruido de emisión (nivel de ruido <1%) y mejoró la estabilidad de la corriente. Por ejemplo, los defectos superficiales, como la acumulación de partículas, pueden causar fluctuaciones locales de densidad de corriente, aumentando el ruido.

El comportamiento dinámico y la estabilidad térmica de la capa activa deben optimizarse mediante un control preciso del proceso (por ejemplo, parámetros de impregnación, temperatura de activación). Por ejemplo, agregar una pequeña cantidad de óxidos de tierras raras puede mejorar la resistencia a la evaporación de la capa activa y prolongar su vida útil. El monitoreo regular de la topografía de la superficie y las propiedades de emisión (por ejemplo, mediante SEM o amperímetro) puede evaluar la estabilidad de la capa activa.

3.3 Factores que afectan el rendimiento de emisión del cátodo de bario y tungsteno

El rendimiento de emisión de los cátodos de tungsteno de bario se ve afectado por una variedad de factores, incluido el entorno operativo, los efectos del envejecimiento y el envenenamiento y los modos de falla.

3.3.1 Entorno de trabajo

El entorno de trabajo tiene un impacto significativo en el rendimiento de emisión de los cátodos de tungsteno de bario, incluida la temperatura, el vacío, la contaminación de la superficie, el campo eléctrico externo y el estrés mecánico.

- **Temperatura de funcionamiento:** La temperatura de funcionamiento ideal para los cátodos de bario-tungsteno es de 900 a 1100 °C (1173 a 1373 K), lo que permite una alta densidad de corriente de transmisión para dispositivos de alta potencia. La temperatura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

excesiva acelera la pérdida por evaporación del bario, afecta la cobertura de la capa activa, aumenta la función de trabajo y reduce la densidad de corriente. Una temperatura demasiado baja limita la difusión de átomos de bario y reduce la eficiencia de emisión.

Mecanismo de influencia: la alta temperatura acelera la evaporación térmica de los átomos de bario y reduce la cobertura de la capa activa; La baja temperatura ralentiza la velocidad de descomposición y difusión, lo que afecta la estabilidad de la función de trabajo.

Estrategias de afrontamiento:

- o La uniformidad de la temperatura se controla mediante un sistema de calentamiento de alta precisión y el monitoreo en tiempo real se lleva a cabo mediante un termómetro infrarrojo.
- o Optimice la proporción de compuestos de bario para ralentizar la pérdida por evaporación del bario a alta temperatura y prolongar la vida útil de la capa activa.
- o Diseñe una estructura de disipación de calor eficiente (como agregar canales de enfriamiento a la parte posterior de la matriz de tungsteno) para evitar el sobrecalentamiento local.
- **Entorno de vacío:** Los cátodos de tungsteno de bario deben funcionar bajo alto vacío para evitar la contaminación por gases residuales. El bajo vacío hace que los compuestos de oxígeno, vapor de agua o carbono reaccionen con el bario para formar compuestos de alta función que reducen la densidad de corriente de emisión.

Mecanismo de influencia: El gas residual reacciona químicamente con los átomos de bario para formar compuestos inertes, aumentando la barrera superficial y reduciendo la eficiencia de escape de los electrones.

Estrategias de afrontamiento:

- o Mantenga el vacío con un sistema de bomba de vacío de alta eficiencia, como una bomba turbomolecular o de iones.
- o La tecnología de sellado al vacío (por ejemplo, el sellado metal-cerámico) y el tratamiento previo al vacío reducen los gases residuales.
- o Limpie la cámara de vacío con regularidad (por ejemplo, limpieza con plasma o horneado a alta temperatura) para eliminar las moléculas de gas adsorbidas.
- **Contaminación de la superficie:** El oxígeno, el vapor de agua, los compuestos de carbono o los sulfuros reaccionan con el bario para formar compuestos funcionales de alta potencia (como el BaCO_3), lo que reduce significativamente la eficiencia de las emisiones. La tasa de contaminación es generalmente proporcional a la presión parcial del gas. Los contaminantes comunes incluyen:

- o Oxígeno: Forma BaO_2 (función de trabajo 2,5 eV).
- o Vapor de agua: forma Ba(OH)_2 (función de trabajo 2,8 eV).
- o Compuestos de carbono: Formación de BaCO_3 (función de trabajo 3.0 eV).

Mecanismo de influencia: El contaminante ocupa el sitio activo a través de la quimisorción, destruye la capa de función de baja potencia y conduce a una disminución en el rendimiento de emisión.

Estrategias de afrontamiento:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Los entornos de salas limpias se utilizan durante la fabricación e instalación de cátodos para reducir la contaminación inicial.
- o El tratamiento previo a la activación elimina los contaminantes de la superficie.
- o Se agregan antitóxicos para formar una capa protectora para ralentizar la tasa de reacción a la contaminación.
- o La regeneración periódica de la superficie (como el bombardeo de iones o la activación criogénica) restaura el rendimiento de las emisiones.

- **Campo eléctrico externo:** El campo eléctrico aplicado mejora el rendimiento de emisión a través del efecto Schottky, reduciendo la función de trabajo y aumentando la densidad de corriente. Sin embargo, los campos eléctricos excesivos pueden desencadenar arcos localizados, lo que provoca daños en la superficie o inestabilidad de las emisiones. La uniformidad insuficiente del campo eléctrico puede conducir a una corriente local excesiva, acelerando el envejecimiento.

Mecanismo de influencia: el alto campo eléctrico reduce las barreras potenciales y mejora la emisión; El campo eléctrico desigual desencadena un sobrecalentamiento local o arcos, dañando la estructura de la superficie.

Estrategias de afrontamiento:

- o Optimice la geometría del electrodo (por ejemplo, electrodo circular liso o estructura de compuerta) para garantizar la uniformidad del campo eléctrico.
 - o Utilice sondas de campo eléctrico para monitorear la intensidad del campo eléctrico en tiempo real para evitar campos eléctricos excesivos.
 - o El pulido de superficies y la reparación de defectos (como la reparación con láser) reducen el riesgo de formación de arcos.
- **Estrés mecánico:** La operación a alta temperatura puede inducir estrés térmico, especialmente en casos de grandes gradientes de temperatura, lo que provoca microgrietas o colapso de poros de la matriz de tungsteno.

Mecanismo de influencia: El estrés térmico daña la estructura de la matriz, afectando la difusión del bario y la estabilidad de la capa activa.

Estrategias de afrontamiento:

- o El calentamiento paso a paso se utiliza para reducir el estrés térmico.
- o Optimice la porosidad, equilibre la resistencia mecánica y la eficiencia de difusión.
- o Utilice una matriz de tungsteno de alta resistencia para mejorar la resistencia al agrietamiento.

La optimización del entorno de trabajo requiere una consideración integral del control de la temperatura, la tecnología de vacío, el diseño de los electrodos y la estabilidad mecánica para garantizar un rendimiento constante de altas emisiones.

3.3.2 Mecanismo del envejecimiento y efectos de toxicidad

Los efectos del envejecimiento y el envenenamiento son las principales razones del deterioro del rendimiento del cátodo de tungsteno con bario, y el mecanismo es el siguiente:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Efecto de envejecimiento:** la operación a largo plazo conduce al agotamiento de los compuestos de bario, la disminución de la cobertura de la capa activa y el aumento de la función de trabajo. La vida útil de un cátodo de bario y tungsteno está estrechamente relacionada con la cantidad de bario almacenado y las condiciones de trabajo.

Mecanismo de influencia: El agotamiento del bario reduce la cobertura de la capa activa, aumenta la barrera superficial y reduce la eficiencia del escape de electrones.

Estrategias de afrontamiento:

- o Aumente la porosidad u optimice las proporciones de compuestos de bario para aumentar el almacenamiento de bario y prolongar la vida útil.
- o La activación regular a baja temperatura repone la capa activa para restaurar la cobertura.
- o Monitoreo en tiempo real de la corriente de transmisión, predicción del proceso de envejecimiento y ajuste de los parámetros operativos con anticipación.
- o Los compuestos de bario de alta capacidad se utilizan para aumentar el almacenamiento inicial de bario para aplicaciones de alta potencia.

- **Efecto de intoxicación:** Los gases residuales (como O_2 , H_2O , CO_2) reaccionan con el bario para formar compuestos funcionales de alta potencia (como BaO_2 , $BaCO_3$), lo que reduce la eficiencia de las emisiones. La tasa de intoxicación es directamente proporcional a la presión parcial del gas, y los contaminantes comunes y sus efectos incluyen:

- o Oxígeno: Forma BaO_2 (función de trabajo 2,5 eV).
- o Vapor de agua: forma $Ba(OH)_2$ (función de trabajo 2,8 eV).
- o Compuestos de carbono: Formación de $BaCO_3$ (función de trabajo 3.0 eV).

Mecanismo de influencia: El contaminante ocupa el sitio activo a través de la quimisorción, destruye la capa de función de baja potencia y conduce a una disminución en el rendimiento de emisión.

Estrategias de afrontamiento:

- o Se agregan agentes antitóxicos para formar una capa protectora, lo que ralentiza la velocidad de reacción y prolonga el tiempo de mantenimiento del rendimiento.
- o El aumento del nivel de vacío reduce la probabilidad de contaminación, como el uso de una combinación de bombas de iones y bombas trampa criogénicas.
- o La regeneración regular de la superficie (como el bombardeo de iones o la activación criogénica) elimina los contaminantes y restaura la densidad de corriente.
- o Optimice el diseño del electrodo (por ejemplo, agregue blindaje) para reducir el contacto de contaminantes con la capa activa.

La gestión de los efectos del envejecimiento y la toxicidad debe lograrse mediante la optimización de materiales, la mejora de procesos y el control ambiental.

3.3.3 Análisis del modo de falla

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los modos de falla de los cátodos de tungsteno de bario incluyen los siguientes tipos, cada uno de los cuales requiere métodos de diagnóstico específicos y estrategias de mejora:

- **Atenuación de emisiones causada por la contaminación de la superficie:** los contaminantes (como BaO_2 , BaCO_3) aumentan la función de trabajo y reducen la densidad de corriente y su rendimiento.

Métodos diagnósticos:

- o La espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) analiza la composición química de la superficie, detecta la relación Ba/O/C y confirma el tipo de contaminante.
- o Las pruebas de emisión termoiónica evalúan la atenuación de la densidad de corriente.
- o La espectroscopia de dispersión de energía (EDS) verifica la distribución de los elementos de la superficie.

Estrategia de mejora:

- o Los aditivos antiintoxicantes se utilizan para formar una capa protectora antioxidante.
 - o Utilice un entorno de alto vacío y limpieza con plasma para eliminar los contaminantes.
 - o Optimice el proceso de activación, como el calentamiento paso a paso, para garantizar la limpieza inicial de la superficie.
- **Agotamiento del bario:** la operación a largo plazo conduce al agotamiento de los compuestos de bario, la cobertura de la capa activa disminuye, la función de trabajo aumenta y la densidad de corriente disminuye.

Métodos diagnósticos:

- o SEM observó la morfología de la capa activa y verificó la cobertura.
- o Las mediciones de la función de trabajo (como las pruebas de emisiones termoiónicas) evalúan la degradación del rendimiento.
- o Análisis EDS del contenido de bario.

Estrategia de mejora:

- o Aumentar el almacenamiento de bario.
 - o La relación optimizada ralentiza el agotamiento del bario y prolonga la vida útil.
 - o La activación regular a baja temperatura repone la capa activa para restaurar la densidad de corriente.
- **Falla mecánica:** El estrés térmico a alta temperatura puede causar grietas o colapso de poros de la matriz de tungsteno, lo que afecta la difusión del bario.

Métodos diagnósticos:

- o La tomografía de rayos X analiza la estructura de los poros para detectar grietas o colapsos.
- o Las pruebas mecánicas, como las pruebas de resistencia a la compresión, evalúan la integridad de la matriz.

Estrategia de mejora:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Optimice el proceso de sinterización (por ejemplo, reduzca la temperatura de sinterización) para mejorar la resistencia de la matriz.
- o El calentamiento paso a paso se utiliza para reducir el estrés térmico.
- o El dopaje mejora la resistencia al agrietamiento.
- **Falla del arco:** Los defectos superficiales (por ejemplo, acumulación de partículas, grietas) o las capas activas desiguales desencadenan arcos localizados, lo que provoca inestabilidad de emisiones o daños en la superficie.

Métodos diagnósticos:

- o La prueba de emisión de alta frecuencia detecta fluctuaciones de corriente.
- o SEM analiza defectos superficiales.
- o Los dispositivos de monitoreo de arco (como los osciloscopios) registran descargas anormales.

Estrategia de mejora:

- o Optimice el proceso de impregnación, como el control de la concentración de la solución, para garantizar la homogeneidad de la capa activa.
- o Pulido de superficies y reparación láser para eliminar defectos.
- o Las optimizaciones del diseño de electrodos (por ejemplo, aumentar el espacio entre compuertas) reducen la concentración del campo eléctrico y reducen el riesgo de arcos.

El análisis de fallas requiere una combinación de diagnósticos multitecnológicos (por ejemplo, XPS, SEM, X-CT, pruebas de emisiones) para identificar con precisión la causa de la falla. Por ejemplo, en aplicaciones de tubos de rayos X, el análisis y la activación regulares de XPS pueden reducir las tasas de falla. Las estrategias de mejora incluyen la optimización de materiales (p. ej., adición de agentes antitóxicos), mejoras en el proceso (p. ej., activación paso a paso) y control ambiental (p. ej., alto vacío) para prolongar la vida útil del cátodo.

En resumen, el principio de funcionamiento y el mecanismo de emisión del cátodo de bario-tungsteno involucran la teoría de la emisión termoiónica, el comportamiento dinámico de la capa activa y la compleja interacción de varios factores ambientales. Este capítulo proporciona un análisis exhaustivo de la ecuación de Richardson-Ducman, el efecto Schottky, la perspectiva de la mecánica cuántica, las características de emisión y los factores de influencia, sentando las bases para los capítulos siguientes para discutir la tecnología de fabricación y la optimización del rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 4: Tecnología de fabricación y procesamiento del cátodo de tungsteno de bario

La tecnología de fabricación y procesamiento de cátodos de tungsteno de bario es un eslabón clave para lograr su alto rendimiento y confiabilidad, lo que afecta directamente su eficiencia de emisión, vida útil y estabilidad en dispositivos electrónicos de vacío. Este capítulo explora en detalle el proceso de moldeo de la matriz de tungsteno porosa, el proceso de impregnación y activación de compuestos de bario y los métodos de prueba y control de calidad, cubriendo el proceso completo desde la preparación de la materia prima hasta la verificación del rendimiento final.

4.1 Moldeo de matriz de tungsteno poroso

La matriz porosa de tungsteno es la estructura central del cátodo de bario-tungsteno, que proporciona una red de poros para almacenar compuestos de bario y canales para apoyar la difusión de átomos de bario activos. Su proceso de moldeo requiere un control preciso de la porosidad, la distribución del tamaño de los poros y la resistencia mecánica para satisfacer las demandas de los cátodos de alto rendimiento. Esta sección detalla los procesos de cribado y prensado del polvo de tungsteno, así como las técnicas de optimización de la porosidad y la resistencia mecánica.

4.1.1 Proceso de cribado y prensado del polvo de tungsteno

El cribado y prensado del polvo de tungsteno son los pasos básicos de la formación de la matriz de tungsteno poroso, que determina la microestructura inicial y las propiedades de procesamiento posteriores de la matriz. El siguiente es el proceso detallado:

- **Cribado de polvo de tungsteno:**
 - o **Selección de materias primas:** El polvo de tungsteno de alta pureza se selecciona para garantizar la estabilidad química, reduciendo las reacciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

secundarias o la contaminación de la superficie causada por impurezas como el hierro, el carbono o el oxígeno. El contenido excesivo de impurezas puede causar oxidación o degradación de la matriz a altas temperaturas.

- o **Control del tamaño de partículas:** Controle la distribución del tamaño de partícula del polvo de tungsteno mediante técnicas de cribado o clasificación del flujo de aire. El rango de tamaño de partícula debe optimizarse de acuerdo con el diseño de los poros. Los polvos más finos crean una estructura de poros más uniforme, lo que los hace adecuados para aplicaciones de alta densidad de corriente; Los polvos más gruesos ofrecen una resistencia mecánica mejorada y son adecuados para necesidades de larga duración. La distribución del tamaño de las partículas se mide mediante un analizador láser del tamaño de las partículas para garantizar la consistencia.
- o **Pretratamiento de polvo:** Para eliminar la capa de óxido o la humedad de la superficie, el polvo de tungsteno debe precalentarse a baja temperatura en una atmósfera de vacío o hidrógeno. El pretratamiento también mejora la fluidez del polvo para el prensado posterior.
- **Proceso de prensado:**
 - o **Diseño de moldes:** Diseñe moldes cilíndricos, de láminas u otros moldes geométricos basados en aplicaciones catódicas (como tubos de microondas o tubos de rayos X). La superficie del molde debe pulirse para reducir los defectos de palanquilla, y el material suele ser acero o carburo de alta resistencia para soportar altas presiones.
 - o **Tecnología de prensado:** El polvo de tungsteno se presiona en palanquillas utilizando tecnología de prensado uniaxial o prensado isostático en frío (CIP). El prensado de un solo eje es adecuado para la producción de lotes pequeños; El prensado isostático en frío crea una palanquilla más uniforme al aplicar presión de manera uniforme, lo que la hace adecuada para aplicaciones de alta precisión. La tasa de presión debe controlarse durante el proceso de prensado para evitar grietas en la palanquilla.
 - o **Adición de aglutinante:** Para mejorar la resistencia verde de la pieza en bruto, se puede agregar una pequeña cantidad de aglutinante orgánico (como alcohol polivinílico o polimetacrilato de metilo). El aglutinante debe volatilizarse completamente en la sinterización posterior para evitar que los residuos afecten a la estructura de los poros.
 - o **Inspección de palanquillas:** Es necesario comprobar la densidad y la integridad de la superficie de la palanquilla prensada. La densidad se mide mediante el método de Arquímedes y los defectos superficiales se identifican mediante microscopía óptica o inspección ultrasónica, lo que garantiza que no haya grietas ni delaminación.
- **Optimización de procesos:**
 - o Optimice la distribución del tamaño de las partículas y la presión de compresión para crear una estructura de poros inicial uniforme. La distribución estrecha del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tamaño de las partículas mejora la uniformidad de los poros pero puede reducir la resistencia; Una amplia distribución del tamaño de las partículas mejora la resistencia, pero puede provocar una porosidad desigual.

- o El entorno de prensado debe controlarse en una sala limpia (nivel ISO 7 o superior) para evitar la contaminación por polvo.
- o Valide experimentalmente los parámetros de prensado, como el uso de un microscopio para observar la distribución de poros de la sección de palanquilla, para garantizar que la estructura inicial cumpla con los requisitos de diseño.

El proceso de cribado y prensado debe garantizar la alta pureza del polvo de tungsteno y la consistencia estructural de la palanquilla para sentar las bases para la posterior sinterización e impregnación.

4.1.2 Optimización de la porosidad y la resistencia mecánica

La porosidad y la resistencia mecánica son los parámetros clave de rendimiento de la matriz de tungsteno poroso, que deben optimizarse mediante el proceso de sinterización y la tecnología de control de poros para equilibrar la capacidad de almacenamiento y la estabilidad estructural de los compuestos de bario. A continuación se muestra un proceso de optimización detallado:

- **Proceso de sinterización:**
 - o **Entorno de sinterización:** La sinterización se lleva a cabo en una atmósfera de vacío o hidrógeno de alta pureza para evitar la oxidación del polvo de tungsteno. La atmósfera de hidrógeno también elimina los aglutinantes residuales y los óxidos superficiales.
 - o **Control de temperatura:** La temperatura de sinterización suele ser de 2000 a 2200 °C, por debajo del punto de fusión del tungsteno para preservar la estructura de los poros. El calentamiento paso a paso reduce el estrés térmico y evita el agrietamiento de la palanquilla. El tiempo de retención se optimiza según el tamaño de la palanquilla.
 - o **Equipo de sinterización:** Se emplean hornos de vacío de alta temperatura u hornos de protección de hidrógeno, equipados con sistemas precisos de control de temperatura. La atmósfera del horno debe ser monitoreada por un analizador de gases para garantizar que no haya contaminación por oxígeno o vapor de agua.
 - o **Formación de poros:** Durante el proceso de sinterización, las partículas de tungsteno forman enlaces fuertes a través de la difusión de la superficie y la unión de los límites de grano, al tiempo que conservan una red de poros conectados tridimensional. Los rellenos temporales, como las microesferas de almidón o poliestireno, pueden volatilizarse durante la sinterización, creando porosidad adicional.
- **Optimización de la porosidad:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Porosidad objetivo:** Controle la porosidad ajustando el tamaño de partícula de polvo de tungsteno, la presión de prensado y las condiciones de sinterización. El rango de porosidad apropiado debe optimizarse de acuerdo con la aplicación, y las aplicaciones de alta densidad de corriente deben tener una porosidad más alta para aumentar el almacenamiento de bario; Las aplicaciones de larga duración requieren una menor porosidad para mejorar la resistencia.
- o **Conectividad de poros:** La conexión de las redes de poros es crucial para la difusión del bario y se puede lograr controlando la distribución del tamaño de las partículas (mezclando partículas finas y más grandes) o agregando rellenos. La tomografía de rayos X (X-TAC) reconstruye la estructura tridimensional de los poros y verifica la conectividad.
- o **Método de medición:** La porosidad se mide por intrusión de mercurio o adsorción de gas (BET), y el área de superficie típica se evalúa por el método BET. La distribución del tamaño de los poros se analiza mediante microscopía o X-CT para garantizar un tamaño de poro uniforme.
- **Optimización de la resistencia mecánica:**
 - o **Objetivo de resistencia:** la matriz debe soportar el estrés térmico y la vibración mecánica durante el funcionamiento a alta temperatura, y la resistencia a la compresión se evalúa mediante pruebas.
 - o **Ajustes del proceso:** Reducir la temperatura de sinterización o acortar el tiempo de mantenimiento puede preservar más porosidad, pero es necesario garantizar la fuerza de unión de las partículas. Los aditivos de trazas de dopaje pueden mejorar la unión del límite del grano y mejorar la resistencia.
 - o **Método de verificación:** Evalúe la resistencia mecánica a través de pruebas de compresión o tracción, y observe el estado de unión de las partículas sinterizadas en combinación con SEM para garantizar que no haya microfisuras ni colapso de poros.
- **Validación de procesos:**
 - o Se utilizó X-CT para analizar la estructura de poros de la matriz sinterizada para verificar que la porosidad y la conectividad cumplieran con los requisitos.
 - o Las pruebas mecánicas combinadas con el análisis microestructural garantizan la estabilidad de la matriz durante el funcionamiento a alta temperatura.
 - o La optimización del proceso requiere experimentos iterativos, como ajustar la temperatura de sinterización y la relación de relleno para equilibrar la porosidad y la resistencia.

La optimización de la porosidad y la resistencia mecánica requiere un control preciso del proceso y una validación multitecnológica para garantizar que la matriz cumpla con los requisitos estructurales y funcionales de los cátodos de alto rendimiento.

4.2 Impregnación y activación de compuestos de bario

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La impregnación y activación de compuestos de bario es el proceso central de introducción de sustancias activas en la matriz porosa de tungsteno y la formación de una capa activa de baja función de trabajo, que afecta directamente el rendimiento de emisión y la vida útil del cátodo. En esta sección se detalla la formulación y optimización del proceso de impregnación, así como las técnicas de tratamiento térmico durante la activación.

4.2.1 Proceso de impregnación: formulación del compuesto de bario y condiciones de impregnación

El proceso de impregnación tiene como objetivo introducir compuestos de bario de manera uniforme en la red de poros de la matriz porosa de tungsteno, asegurando un suministro continuo de átomos de bario activos. A continuación se muestra un flujo de proceso detallado y un método de optimización:

- **Formulación del compuesto de bario:**
 - o **Selección de materiales:** El aluminato de calcio de bario de uso común se usa ampliamente debido a sus excelentes propiedades de descomposición térmica y estabilidad química. La formulación libera átomos de bario libres a temperatura de funcionamiento a través de las siguientes reacciones:



los subproductos (por ejemplo, CaO, Al₂O₃) son altamente estables y no interfieren con las propiedades de emisión.

- o **Optimización de la relación:** Ajuste la relación de acuerdo con los requisitos de la aplicación. Las aplicaciones de alta densidad de corriente pueden utilizar una alta proporción de contenido de bario para aumentar la tasa de liberación de bario. Las aplicaciones de larga duración pueden aumentar la proporción de CaO o Al₂O₃ para ralentizar la tasa de descomposición. La adición de agentes antitóxicos como La₂O₃ o CeO₂ mejora la capacidad antioxidante.
- o **Características de las partículas:** Los compuestos de bario deben molerse al nivel de micras para que coincidan con el tamaño de los poros de la matriz para evitar la obstrucción de los poros o la distribución desigual.

- **Preparación de la solución:**
 - o **Selección de disolventes:** Los compuestos de bario se mezclan con agua desionizada o disolventes orgánicos como etanol o isopropanol para formular una suspensión. El agua desionizada es de bajo costo, pero debe estar libre de impurezas; Los disolventes orgánicos pueden mejorar la dispersabilidad, pero se tienen en cuenta la volatilidad y la seguridad.
 - o **Procesamiento de dispersión:** La agitación o sonicación de alta velocidad garantiza una dispersión uniforme de las partículas para evitar la aglomeración. La concentración de la solución debe optimizarse para equilibrar la eficiencia de permeabilidad y el llenado de poros.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Aditivos:** Pequeñas cantidades de tensioactivos, como el polietilenglicol, pueden mejorar la humectabilidad de la solución y promover la penetración en los poros.
- **Proceso de impregnación:**
 - o **Impregnación al vacío:** Se coloca una matriz de tungsteno porosa en una cámara de vacío para eliminar el aire de los poros y posteriormente se introduce una solución compuesta de bario. El entorno de vacío mejora la eficiencia de penetración de la solución y reduce los residuos de burbujas. El tiempo de impregnación se optimiza en función de la porosidad de la matriz.
 - o **Impregnación a presión:** Se aplica a sustratos de alta porosidad aplicando una presión moderada para facilitar la penetración de la solución en los poros. La presión debe controlarse para evitar la deformación de la matriz o la obstrucción de los poros.
 - o **Control del proceso:** La impregnación debe realizarse en una sala limpia (ISO clase 5 o superior) para evitar la contaminación por polvo o impurezas. La superficie de la matriz debe limpiarse previamente (por ejemplo, limpieza ultrasónica) para eliminar la grasa o los óxidos.
- **Secado:**
 - o El sustrato impregnado se seca a baja temperatura para eliminar el disolvente. El secado debe realizarse en vacío o en atmósfera inerte para evitar la reacción de los compuestos de bario con el oxígeno o el vapor de agua en el aire.
 - o El secado paso a paso evita la obstrucción de los poros causada por la rápida volatilización de la solución. Después del secado, la matriz debe verificarse en busca de incrementos de peso para garantizar que el relleno del compuesto de bario esté en línea con los requisitos de diseño.
- **Validación de procesos:**
 - o Se utilizaron SEM y EDS para analizar la uniformidad de distribución de los compuestos de bario para verificar el relleno de poros.
 - o Confirme la cantidad de relleno mediante análisis gravimétrico y observe la sección de poros en combinación con un microscopio para asegurarse de que no haya obstrucciones ni huecos.
 - o Optimice los parámetros de impregnación, como el vacío, la presión y la concentración de la solución, para mejorar la eficiencia y la uniformidad del llenado.

El proceso de impregnación debe garantizar que los compuestos de bario se distribuyan uniformemente a través de la red de poros para proporcionar una fuente estable de bario para su posterior activación.

4.2.2 Proceso de activación: tratamiento térmico y formación de la capa superficial activa

El proceso de activación descompone el compuesto de bario impregnado mediante tratamiento térmico y forma una capa activa de baja función de trabajo en la superficie de la matriz de tungsteno,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que es un paso clave para lograr el rendimiento de emisión catódica. El siguiente es el proceso detallado:

- **Tratamiento térmico:**

- o **Control ambiental:** La activación se realiza en un alto vacío o en una atmósfera inerte (por ejemplo, argón de alta pureza) para evitar la oxidación o contaminación de los compuestos de bario. Los sistemas de bombas de vacío, como las bombas turbomoleculares, garantizan una baja presión parcial de gas residual.
- o **Procedimiento de temperatura:** Se emplea un calentamiento paso a paso para evitar el agrietamiento de la matriz debido al estrés térmico. El tiempo de retención se optimiza de acuerdo con la proporción de compuestos de bario. Las altas temperaturas provocan la descomposición de los compuestos de bario, liberando átomos de bario libres y difundiéndose a la superficie a través de los poros.
- o **Requisitos del equipo:** Utilice un horno de vacío de alta temperatura o un horno de calentamiento por resistencia con un sistema de control de temperatura preciso. Los termómetros infrarrojos monitorean la temperatura del sustrato en tiempo real, asegurando la uniformidad.

- **Formación de capas de tensioactivos:**

- o **Difusión y adsorción de bario:** Los átomos de bario libres se difunden a la superficie de la matriz de tungsteno a través de una red de poros, formando una sola capa atómica o película delgada. Los átomos de bario quimisorptos forman un fuerte enlace con la superficie del tungsteno, reduciendo la función de trabajo a 1,1-1,5 eV. Los átomos de bario adsorbidos físicamente proporcionan una reposición continua y mantienen el equilibrio dinámico de la capa activa.
- o **Control de topografía de la superficie:** La capa activa debe ser uniforme y continua, y la rugosidad de la superficie debe controlarse a un nivel bajo mediante pulido. La capa activa desigual puede conducir a regiones de función locales de alta potencia, reduciendo la eficiencia de las emisiones.
- o **Efecto aditivo:** Agregar una pequeña cantidad de óxidos de tierras raras puede mejorar la estabilidad térmica de la capa activa y ralentizar la pérdida por evaporación del bario.

- **Optimización de procesos:**

- o La temperatura y el tiempo de activación deben ajustarse de acuerdo con la proporción de compuestos de bario y la estructura de poros de la matriz. Una temperatura demasiado alta puede acelerar la evaporación del bario y acortar la vida útil; Una activación insuficiente puede dar lugar a una baja cobertura de la capa activa, lo que afecta a la calidad de emisión de las emisiones.
- o La activación paso a paso se puede llevar a cabo por etapas, estabilizando el compuesto de bario antes de formar una capa activa.
- o Después de la activación, debe enfriarse a temperatura ambiente para evitar defectos superficiales causados por el estrés térmico.

- **Validación de procesos:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o El rendimiento de emisión de la capa activa se verifica mediante pruebas de emisión termoiónica para garantizar que la densidad de corriente alcance el valor objetivo.
- o AFM y SEM analizan la topografía de la superficie para confirmar la uniformidad y rugosidad de la capa activa.
- o XPS analiza la composición química de la superficie para verificar el efecto de la cobertura de átomos de bario y la reducción de la función de trabajo.

El proceso de activación requiere un control preciso de la temperatura y el entorno para formar una capa activa estable que garantice el funcionamiento de alto rendimiento del cátodo.

4.3 Control de calidad y pruebas de cátodos de bario y tungsteno

El control de calidad y las pruebas son aspectos clave para garantizar la consistencia y confiabilidad del rendimiento del cátodo de tungsteno de bario, incluidas las pruebas de rendimiento de emisiones, la evaluación de conformidad y el análisis de fallas. En esta sección se detalla la metodología y las normas.

4.3.1 Método de prueba para la calidad de transmisión

Las pruebas de rendimiento de emisiones están diseñadas para evaluar la densidad actual, la función de trabajo y la estabilidad de emisiones de los cátodos de bario-tungsteno para verificar la efectividad del proceso de fabricación. El siguiente es un método de prueba detallado:

- **Prueba de emisión termoiónica:**

- o **Condiciones de prueba:** En un entorno de alto vacío, caliente el cátodo a la temperatura de funcionamiento y mida la corriente de emisión utilizando un colector de ánodo y un amperímetro de precisión. El dispositivo de prueba debe estar equipado con una fuente de alimentación de alta precisión y un sistema de control de temperatura.
- o **Procedimiento de prueba:** Aplique un voltaje de ánodo que aumente gradualmente y registre la curva característica de corriente-voltaje (curva I-V). Calcule la función de trabajo utilizando la ecuación de Richardson-Dushman:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

asegúrese de que la función de trabajo esté en el rango de 1,1 a 1,5 eV y que la densidad de corriente cumpla con los requisitos de diseño.

- o **Análisis de datos:** Evaluar la estabilidad y los niveles de ruido de la corriente transmitida. Las fluctuaciones anormales pueden indicar capas activas desiguales o contaminación de la superficie.

- **Prueba de pulso:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Propósito** de la prueba: Simular condiciones de operación transitorias en dispositivos de alta potencia y evaluar el rendimiento de los cátodos bajo altos campos eléctricos o altas densidades de corriente.
- o **Proceso de prueba:** Aplique un voltaje de pulso para medir la densidad de corriente transitoria y el tiempo de respuesta. Las pruebas detectan el ruido emitido debido a defectos superficiales o falta de homogeneidad.
- o **Requisitos del equipo:** Utilice fuentes de alimentación de pulso de alta frecuencia y osciloscopios para registrar las formas de onda actuales y garantizar la precisión de la medición.
- **Pruebas de vida:**
 - o **Condiciones de prueba:** Funcionamiento continuo durante miles de horas en condiciones de funcionamiento simuladas, monitoreando la disminución de la densidad de corriente.
 - o **Proceso de prueba:** Registre regularmente la densidad de corriente y los cambios en la función de trabajo, y dibuje curvas de decaimiento del rendimiento. Las pruebas evalúan las tasas de envejecimiento y la estabilidad de la capa activa.
 - o **Análisis de datos:** Prediga la vida útil del cátodo a través de curvas de atenuación para garantizar que se satisfagan las necesidades de la aplicación.
- **Método de verificación:**
 - o Los resultados de la prueba deben compararse con las especificaciones de diseño, como que la densidad de corriente debe alcanzar el valor objetivo y la función de trabajo debe cumplir con las expectativas.
 - o Múltiples pruebas para garantizar la confiabilidad de los datos, excluyendo errores de equipo o interferencias ambientales.

Las pruebas de rendimiento de emisiones se realizan en un entorno de prueba estandarizado, combinado con análisis multiparamétrico, para garantizar que el rendimiento del cátodo cumpla con los requisitos de la aplicación.

4.3.2 Criterios de evaluación de consistencia y confiabilidad

La consistencia y la confiabilidad son requisitos clave para la producción a gran escala de cátodos de bario y tungsteno y se evalúan según los siguientes criterios:

- **Evaluación de conformidad:**
 - o **Monitoreo de parámetros:** Análisis estadístico de la densidad de corriente de emisión, función de trabajo y vida útil de múltiples lotes de cátodos, y cálculo del coeficiente de variación (desviación estándar / media). El factor de variación debe mantenerse bajo para garantizar un rendimiento constante de un lote a otro.
 - o **Verificación de microestructura:** analice la estructura de poros de la matriz y la distribución del compuesto de bario utilizando SEM y X-CT para garantizar una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

porosidad y un volumen de llenado constantes de un lote a otro. La rugosidad de la superficie se mide mediante AFM.

- o **Control de procesos:** La tecnología de control estadístico de procesos (SPC) se utiliza para monitorear la presión de prensado, la temperatura de sinterización y los parámetros de impregnación en tiempo real, y ajustar las desviaciones a tiempo. Los gráficos de control se pueden utilizar para realizar un seguimiento de la estabilidad de los parámetros clave.
- **Evaluación de confiabilidad:**
 - o **Pruebas de envejecimiento acelerado:** Funciona en condiciones de alta temperatura o alta densidad de corriente para evaluar la degradación del rendimiento del cátodo en entornos extremos. Los resultados de la prueba se utilizan para calcular el tiempo medio entre fallas (MTBF) y la probabilidad de falla.
 - o **Pruebas de adaptabilidad ambiental:** Pruebas en condiciones de operación simuladas para verificar la estabilidad del cátodo en diferentes entornos.
 - o **Desarrollo de estándares:** Los indicadores de confiabilidad se desarrollan en función de los requisitos de la aplicación (por ejemplo, tubos de microondas o tubos de rayos X).
- **Método de verificación:**
 - o Combine datos de pruebas de lotes múltiples para evaluar la repetibilidad y estabilidad del proceso de producción.
 - o Utilice software estadístico para analizar las distribuciones de parámetros para garantizar que se cumplan las distribuciones normales o las tolerancias objetivo.
 - o Calibre regularmente el equipo de prueba para garantizar la precisión y consistencia de la medición.

La evaluación de la conformidad y la fiabilidad requiere pruebas sistemáticas y análisis de datos para garantizar la estabilidad del rendimiento de los cátodos en la producción y las aplicaciones.

4.3.3 Análisis y mejora de fallas

El análisis de fallas tiene como objetivo identificar las causas de la degradación o falla del cátodo de bario y tungsteno y proponer medidas de mejora específicas. Los siguientes son modos de falla y métodos de análisis comunes:

- **Contaminación superficial:**
 - o **Mecanismo de falla:** Los compuestos de oxígeno, vapor de agua o carbono reaccionan con el bario para formar compuestos de alta función de trabajo (como BaO_2 o BaCO_3), lo que reduce el rendimiento de emisiones.
 - o **Métodos diagnósticos:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) analiza la composición química de la superficie, detecta la relación Ba/O/C y confirma el tipo de contaminante.
- Las pruebas de emisión termoiónica evalúan la atenuación de la densidad de corriente para verificar los efectos de la contaminación.
- o **Medidas de mejora:**
 - Aumente el nivel de vacío para reducir la contaminación por gases residuales.
 - Se agregan antitóxicos como La_2O_3 para formar una capa protectora.
 - La limpieza con plasma se utiliza para eliminar los contaminantes de la superficie.
- **Agotamiento del bario:**
 - o **Mecanismo de falla:** la operación a largo plazo conduce al agotamiento de los compuestos de bario, la disminución de la cobertura de la capa activa y el aumento de la función de trabajo.
 - o **Métodos diagnósticos:**
 - SEM y EDS analizaron el contenido de bario y la morfología de la capa activa para verificar la cobertura.
 - Las mediciones de la función de trabajo (mediante pruebas de emisión termoiónica) evalúan la degradación del rendimiento.
 - o **Medidas de mejora:**
 - Optimice la proporción de compuestos de bario para aumentar el almacenamiento de bario.
 - Mejorar la porosidad para aumentar la capacidad de llenado.
 - Activación regular a baja temperatura para reponer la capa activa.
- **Fallo mecánico:**
 - o **Mecanismo de falla:** El estrés térmico o la vibración mecánica pueden causar grietas en la matriz o colapso de los poros, lo que afecta la difusión del bario.
 - o **Métodos diagnósticos:**
 - X-CT analiza la estructura de los poros para detectar grietas o colapsos.
 - Las pruebas mecánicas (como las pruebas de compresión) evalúan la resistencia del sustrato.
 - o **Medidas de mejora:**
 - Optimice el proceso de sinterización para mejorar la unión de partículas.
 - El calentamiento paso a paso se utiliza para reducir el estrés térmico.
 - Dopado con ZrO_2 mejora la resistencia al agrietamiento.
- **Fallo de arco:**
 - o **Mecanismo de falla:** Los defectos superficiales o las capas activas desiguales desencadenan arcos localizados, lo que provoca inestabilidad de emisiones o daños en la superficie.
 - o **Métodos diagnósticos:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- SEM detecta defectos superficiales como acumulación de partículas o grietas.
- La prueba de emisión de alta frecuencia (frecuencia 1 kHz) registra las fluctuaciones de corriente.
- El osciloscopio monitorea la señal del arco.
- o **Medidas de mejora:**
 - El proceso de impregnación optimizado garantiza la uniformidad de la capa activa.
 - El pulido de superficies reduce los defectos.
 - Optimice el diseño de los electrodos para reducir la concentración del campo eléctrico.
- **Método de análisis de fallas:**
 - o **Análisis de árbol de fallas (FTA):** Construya un árbol de causas de falla para identificar los principales modos de falla (por ejemplo, agotamiento de bario o contaminación de la superficie) y sus causas raíz (por ejemplo, desviaciones de parámetros de proceso).
 - o **Control estadístico de procesos (SPC):** analice los datos de fallas, identifique los cuellos de botella del proceso y optimice los parámetros clave.
 - o **Diagnósticos multitécnica:** combine XPS, SEM, X-CT y pruebas de emisiones para analizar exhaustivamente los mecanismos de falla.
- **Estrategia de mejora:**
 - o Optimice los parámetros del proceso (por ejemplo, temperatura de sinterización, presión de impregnación) para mejorar la consistencia catódica.
 - o Introducción de sistemas de monitorización online, como sensores de temperatura o analizadores de gases, para detectar desviaciones del proceso en tiempo real.
 - o Establecer un mecanismo de retroalimentación para aplicar los resultados del análisis de fallas a la mejora de procesos y reducir la tasa de fallas.

El análisis de fallas requiere una combinación de diagnósticos multitecnológicos y métodos de análisis sistemáticos para garantizar que se identifique la causa raíz y se propongan medidas de mejora efectivas.

Este capítulo explica cada paso del proceso, desde la formación de la matriz de tungsteno hasta la formación de la capa activa, así como los métodos clave de prueba de rendimiento y análisis de fallas, proporcionando una base técnica sólida para la producción y optimización de cátodos de alto rendimiento, y proporcionando garantía de proceso para el desarrollo posterior de aplicaciones y la mejora del rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Capítulo 5: Aplicación del cátodo de tungsteno de bario

Los cátodos de tungsteno de bario juegan un papel clave como fuentes de emisión termiónica eficientes en muchos campos de alta tecnología debido a su baja función de trabajo, alta densidad de corriente de emisión y excelente estabilidad térmica. Este capítulo analiza en detalle los usos específicos de los cátodos de tungsteno de bario en electrónica de vacío, instrumentos científicos, industria y comunicaciones, aeroespacial y defensa, y aplicaciones emergentes y de campo cruzado, y analiza sus roles y requisitos técnicos en diferentes escenarios.

5.1 Electrónica de vacío

Los dispositivos electrónicos de vacío utilizan el movimiento de electrones en un entorno de vacío para lograr la amplificación de la señal, la oscilación o la conversión de energía, y se utilizan ampliamente en los campos de las comunicaciones, el radar y la industria. Los cátodos de tungsteno de bario sirven como una fuente de emisión de electrones de alta eficiencia, proporcionando un flujo constante de electrones de alta corriente a estos dispositivos, cumpliendo con los requisitos de alta potencia y frecuencia.

5.1.1 Tubo de microondas

Los tubos de microondas son una clase de dispositivos electrónicos de vacío que utilizan haces de electrones para interactuar con campos electromagnéticos para generar o amplificar señales de microondas, que se utilizan ampliamente en radares, comunicaciones y experimentos científicos. Los cátodos de tungsteno de bario son indispensables en los tubos de microondas debido a su alta eficiencia de emisión y estabilidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.1.1 Magnetrón: Utilizado en equipos de calentamiento por radar y microondas

- **Introducción del equipo:** El magnetrón es un oscilador de microondas de alta potencia que excita la cavidad del resonador para generar señales de microondas de alta frecuencia (generalmente en el rango de GHz) moviendo electrones a lo largo de una órbita específica bajo la interacción de campos eléctricos y magnéticos. Sus componentes principales incluyen un cátodo (fuente de electrones), una cavidad resonante de ánodo y un sistema de campo magnético. Los magnetrones se utilizan ampliamente en sistemas de radar (por ejemplo, radares meteorológicos, radares militares de seguimiento de objetivos) y equipos de calentamiento por microondas (por ejemplo, hornos de microondas industriales, equipos de secado por microondas) debido a su capacidad para generar pulsos de alta potencia (kW a MW) o señales de microondas continuas.

Principio de funcionamiento: El cátodo emite electrones, formando una nube de electrones giratoria bajo la acción de campos eléctricos y magnéticos cruzados, junto con la cavidad resonante del ánodo para generar una señal de microondas de una frecuencia específica.

- **Función del cátodo de tungsteno de bario:** El cátodo de tungsteno de bario sirve como fuente de electrones del magnetrón, proporcionando un flujo de electrones de alta densidad de corriente y admitiendo una salida de microondas de alta potencia.
- **Requisitos del cátodo:**
 - **Alta densidad de corriente:** Los magnetrones requieren una alta densidad de corriente de transmisión para admitir una salida de alta potencia. Los cátodos de tungsteno de bario proporcionan una emisión estable a altas temperaturas para satisfacer las demandas de energía.
 - **Respuesta rápida:** La operación de pulsos de radar requiere que el cátodo responda a voltajes de pulsos de alta frecuencia en microsegundos, con bajo ruido de emisión y una capa activa uniforme.
 - **Resistencia a la vibración:** la vibración mecánica en el radar militar requiere una alta resistencia mecánica de la matriz del cátodo para evitar el colapso de los poros o el desconchado de la capa activa, y es necesario optimizar el proceso de sinterización y la estructura de la matriz.
- **Ventajas técnicas:** La baja función de trabajo y la alta estabilidad térmica de los cátodos de bario y tungsteno les permiten operar durante períodos prolongados en condiciones de alta potencia y pulso, satisfaciendo las necesidades de los magnetrones de fuentes de electrones eficientes y confiables.

5.1.1.2 TWT: Comunicaciones de alta frecuencia y amplificadores de satélite

- **Introducción del equipo:** El tubo de onda viajera (TWT) es un amplificador de microondas de banda ancha que amplifica las señales de alta frecuencia a través de la interacción de los haces de electrones con los campos de ondas viajeras. Sus componentes principales incluyen un cátodo, una estructura de onda lenta, un sistema de enfoque de haz de electrones y un electrodo de recolección. Los TWT se utilizan ampliamente en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

comunicaciones satelitales (amplificación de señal ascendente / descendente), estaciones base 5G y sistemas de transmisión debido a sus características de alta ganancia y banda ancha.

Principio de funcionamiento: El haz de electrones emitido por el cátodo viaja sincrónicamente con la señal de microondas de entrada en una estructura de onda lenta (como una espiral), y la energía cinética del haz de electrones se transfiere a la señal para lograr la amplificación y la salida.

- **Acción del cátodo de bario-tungsteno:** El cátodo de bario-tungsteno proporciona un haz de electrones estable, lo que respalda la amplificación de la señal de alta frecuencia del tubo de onda viajera.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Alta uniformidad de emisión:** el tubo de onda viajera necesita un haz de electrones estable para garantizar la calidad de la amplificación de la señal, y la capa activa del cátodo debe ser uniforme y tener una baja rugosidad superficial para evitar la distorsión de la señal.
 - o **Larga vida útil:** la comunicación por satélite requiere una larga vida útil del cátodo y la proporción de compuestos de bario debe optimizarse para ralentizar la pérdida por evaporación del bario.
 - o **Antitoxicidad:** Puede haber trazas de gases residuales en el entorno espacial y es necesario agregar antitóxicos para mantener el rendimiento.
- **Ventajas técnicas:** La alta densidad de corriente y las capacidades antienvenamiento de los cátodos de tungsteno de bario garantizan la estabilidad de la señal y la confiabilidad de los tubos de onda viajera en una operación de alta frecuencia y larga duración.

5.1.1.3 Tubo Klystron: radar de alta potencia y acelerador de partículas

- **Introducción del equipo:** Klystron es un amplificador u oscilador de microondas de alta potencia que genera o amplifica señales de microondas a través de la modulación de velocidad de un haz de electrones en la cavidad resonante. Sus componentes principales incluyen un cátodo, una cavidad resonante, un tubo de deriva y un electrodo de recolección. Los tubos Klystron se utilizan ampliamente en radares de alta potencia (por ejemplo, radares de control de tráfico aéreo, radares de guía de misiles) y aceleradores de partículas (por ejemplo, fuentes de radiación sincrotrón, LHC del CERN).

Principio de funcionamiento: El haz de electrones emitido por el cátodo se modula en velocidad a medida que pasa a través de la cavidad resonante, formando un haz de modulación de densidad, que convierte la energía cinética en energía de microondas en la cavidad posterior.

- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** El cátodo de tungsteno de bario proporciona un haz de electrones de alta corriente, lo que respalda la salida de alta potencia del tubo klystron.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Densidad de corriente ultra alta:** El klystron requiere un flujo de electrones extremadamente alto para soportar una salida de nivel MW, y el cátodo debe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

combinarse con el efecto Schottky para mejorar la emisión en campos eléctricos altos.

- o **Estabilidad térmica:** las fluctuaciones en la temperatura de funcionamiento requieren que el cátodo mantenga un rendimiento estable, y es necesario optimizar la conductividad térmica de la matriz y la resistencia al calor de la capa activa.
- o **Compatibilidad con alto vacío:** En cátodos de ultra alto vacío, es necesario evitar la degradación del rendimiento causada por la contaminación de la superficie.
- **Ventajas técnicas:** Los cátodos de tungsteno de bario proporcionan una emisión de electrones estable en condiciones de alta potencia y alto campo eléctrico, cumpliendo con los requisitos operativos extremos de los tubos klystron.

5.1.2 Tubos de rayos X

Los tubos de rayos X son dispositivos de vacío que generan rayos X bombardeando objetivos metálicos con electrones de alta energía, ampliamente utilizados en campos médicos e industriales. El cátodo de tungsteno de bario le proporciona una fuente de electrones altamente eficiente.

5.1.2.1 Equipos de imágenes médicas (por ejemplo, escáneres de tomografía computarizada, máquinas de diagnóstico por rayos X)

- **Introducción del equipo:** Los tubos de rayos X son los componentes centrales de los equipos de imágenes médicas (como tomografía computarizada, tomografía computarizada, instrumentos de diagnóstico de rayos X), que generan rayos X bombardeando electrónicamente objetivos de ánodo (como tungsteno o molibdeno) para obtener imágenes de tejidos humanos. Sus componentes principales incluyen el cátodo, el ánodo y la carcasa de vacío. Los escáneres de TC generan imágenes tridimensionales a través de proyecciones de rayos X de múltiples ángulos, y las máquinas de rayos X de diagnóstico se utilizan para el examen de huesos o tejidos blandos.

Cómo funciona: El cátodo emite electrones que bombardean el ánodo bajo la aceleración de un campo eléctrico de alto voltaje, produciendo rayos X característicos y rayos X espectrales continuos para imágenes fluoroscópicas.

- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** El cátodo de tungsteno de bario proporciona un haz de electrones de alta energía que genera una señal de rayos X de alta calidad.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Alta estabilidad de emisión:** la calidad de la imagen requiere un flujo de electrones estable y el cátodo debe emitirse uniformemente para reducir las fluctuaciones de corriente.
 - o **Inicio rápido:** el equipo de diagnóstico debe iniciarse rápidamente y el cátodo debe alcanzar la temperatura de funcionamiento y emitir de manera estable en poco tiempo.
 - o **Larga vida útil:** Los equipos médicos requieren una larga vida útil del cátodo y es necesario optimizar el almacenamiento de bario y las capacidades anti-venenamiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ventajas técnicas:** La alta densidad de corriente y las capacidades de respuesta rápida de los cátodos de bario-tungsteno garantizan la precisión y confiabilidad de las imágenes de los tubos de rayos X, cumpliendo con los altos estándares de los dispositivos médicos.

5.1.2.2 Ensayos industriales no destructivos

- **Introducción del equipo:** Los tubos de rayos X se utilizan en NDT industriales para detectar defectos internos (como grietas, porosidad), calidad de soldadura o estructura de componentes electrónicos. Funciona de manera similar a los tubos de rayos X médicos, pero requiere una mayor energía de rayos X para penetrar metales gruesos o compuestos. Los escenarios de aplicación incluyen inspección de componentes de aviación, análisis de soldaduras de tuberías e inspección de paquetes de semiconductores.
- **Cómo funciona:** Un haz de electrones de alta energía bombardea el objetivo para generar rayos X, que son capturados por el detector después de transmitir la muestra, formando una imagen de la estructura interna.
- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** El cátodo de tungsteno de bario proporciona un haz de electrones de alta intensidad, lo que respalda la generación de rayos X de alta energía.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Salida de alta potencia:** la inspección industrial requiere rayos X de alta energía y los cátodos deben proporcionar una alta densidad de corriente.
 - o **Adaptabilidad ambiental:** Los entornos industriales pueden experimentar vibraciones o cambios de temperatura, y los cátodos deben tener una alta resistencia mecánica y estabilidad térmica.
 - o **Resistencia a la contaminación:** Las condiciones de vacío no ideales requieren que el cátodo se mejore contra el envenenamiento a través de aditivos.
- **Ventajas técnicas:** La robustez y la alta eficiencia de emisión de los cátodos de tungsteno de bario los hacen adecuados para las exigentes condiciones de inspección industrial, proporcionando señales de rayos X de alta calidad.

5.1.3 Otros dispositivos de vacío

- **Tubo fotomultiplicador :**
 - o **Introducción del equipo:** El tubo fotomultiplicador (PMT) es un fotodetector de alta sensibilidad que convierte señales de luz débiles en señales eléctricas, que se utilizan ampliamente en detectores de radiación (como la detección de rayos gamma), observaciones astronómicas y conteo de fotones en experimentos científicos. Sus componentes principales incluyen un fotocátodo, un multiplicador de electrones y un ánodo.
 - **Principio de funcionamiento:** El fotocátodo absorbe fotones y emite electrones, que son amplificados por el multiplicador y recogidos por el ánodo para formar una señal eléctrica detectable.
 - o **Acción catódica de tungsteno de bario:** Proporciona una emisión de electrones altamente sensible y apoya la generación de señales fotoeléctricas iniciales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Requisitos de cátodo:** Se requiere un ruido de emisión extremadamente bajo y un tiempo de respuesta rápido para garantizar la precisión de la detección de fotones.
- o **Ventajas técnicas:** Las características de bajo ruido y alta sensibilidad de los cátodos de bario y tungsteno los convierten en fuentes de electrones ideales para tubos fotomultiplicadores.
- **Equipo de soldadura por haz de electrones:**
 - o **Introducción del equipo:** El equipo de soldadura por haz de electrones utiliza materiales fundidos por haz de electrones de alta energía para soldadura de alta precisión, que se usa ampliamente en las industrias aeroespacial, automotriz y nuclear. Sus componentes principales incluyen un cátodo, un sistema óptico de electrones y una cámara de vacío.

Principio de funcionamiento: El haz de electrones emitido por el cátodo se acelera y enfoca en alto vacío, bombardeando la pieza de trabajo para generar una alta temperatura local y lograr una soldadura de fusión profunda.
 - o **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** Proporciona un haz de electrones de alta energía que admite la soldadura por fusión profunda.
 - o **Requisitos del cátodo:** se requiere una alta densidad de corriente y un rendimiento estable de enfoque del haz de electrones, y la temperatura de funcionamiento debe controlarse con precisión para evitar el sobrecalentamiento.
 - o **Ventajas técnicas:** La alta eficiencia de emisión y la estabilidad de los cátodos de tungsteno de bario garantizan precisión y eficiencia en la soldadura.

5.2 Instrumentos científicos

Los cátodos de tungsteno de bario sirven como fuentes de electrones de alto rendimiento en instrumentos científicos, lo que respalda las tareas de análisis e imágenes de alta resolución que cumplen con los requisitos de alta precisión y sensibilidad.

5.2.1 Microscopio electrónico

- **Introducción del equipo:** El microscopio electrónico utiliza imágenes de haz electrónico y se divide en microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión (TEM). SEM escanea la superficie de la muestra a través de un haz de electrones, recolecta electrones secundarios o electrones retrodispersados para formar una imagen de topografía superficial con una resolución de nanómetros; TEM penetra en muestras ultrafinas con un haz de electrones para generar imágenes de estructuras internas con resoluciones hasta el nivel sub-angstrom. Ambos se utilizan ampliamente en la investigación de ciencia de materiales, biología y nanotecnología.

Cómo funciona: El haz de electrones emitido por el cátodo es acelerado por un campo eléctrico y enfocado por un campo magnético, escaneado (SEM) o penetrado (TEM) y capturado por el detector para generar una imagen de alta resolución.
- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** Proporciona un haz de electrones de alto brillo y admite imágenes a subnanoescala.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Alto brillo:** Se requiere alta densidad de corriente y bajo ruido de emisión para lograr una alta resolución.
 - o **Estabilidad:** Las imágenes a largo plazo requieren bajas fluctuaciones en la corriente de emisión y es necesario optimizar la uniformidad de la capa activa.
 - o **Compatibilidad con vacío:** El vacío ultra alto requiere una fuerte resistencia del cátodo a la contaminación.
- **Ventajas técnicas:** El alto brillo y la estabilidad del cátodo de tungsteno de bario lo convierten en una fuente ideal de electrones para SEM y TEM.

5.2.2 Espectrómetro de masas: Fuente de iones de alta sensibilidad

- **Introducción del equipo:** El espectrómetro de masas es un instrumento analítico que determina la composición y estructura molecular ionizando moléculas de muestra y midiendo su relación masa-carga, y se usa ampliamente en análisis químico, monitoreo ambiental e investigación biomédica. Sus componentes principales incluyen una fuente de iones, un analizador de masas y un detector.

Principio de funcionamiento: El cátodo emite electrones para bombardear las moléculas de la muestra y, después de generar iones, se separan mediante campos eléctricos o magnéticos, y las especies moleculares se detectan de acuerdo con la relación masa-carga.
- **Acción catódica de tungsteno de bario:** Proporciona un flujo estable de electrones para la ionización de muestras.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Alta sensibilidad:** Se requiere un flujo constante de electrones de baja energía para mejorar la eficiencia de ionización, y el cátodo debe funcionar a temperaturas más bajas.
 - o **Larga vida útil:** las tareas analíticas deben ejecutarse durante largos períodos de tiempo y los cátodos deben extenderse optimizando la proporción de bario.
- **Ventajas técnicas:** La baja función de trabajo y la alta eficiencia de emisión del cátodo de bario-tungsteno garantizan una alta sensibilidad y estabilidad a largo plazo del espectrómetro de masas.

5.2.3 Equipo de análisis de superficies

- **Introducción del equipo:** El espectrómetro de electrones de barrena (AES) y el espectrómetro de fotoelectrones de rayos X (XPS) son instrumentos de análisis de superficies utilizados para estudiar la composición química y la estructura electrónica de las superficies de los materiales. AES genera electrones Auger excitando la muestra con un haz de electrones para analizar especies elementales; XPS excita fotoelectrones a través de rayos X, elementos de medición y estados químicos. Ambos se utilizan ampliamente en la ciencia de los materiales y la investigación de semiconductores.

Cómo funciona: Una fuente de electrones o rayos X que emite cátodos excita la muestra y recoge los electrones emitidos para el análisis espectral de energía.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Acción catódica de tungsteno y bario:** Proporciona un haz de electrones estable (AES) para admitir el análisis de superficies de alta precisión.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Alta precisión:** Se requiere un flujo estable de electrones de baja energía, y el cátodo debe proporcionar una emisión uniforme y características de bajo ruido.
 - o **Compatibilidad con vacío ultra alto:** El cátodo debe evitar la contaminación de la superficie.
- **Ventajas técnicas:** La emisión uniforme y la resistencia a la contaminación de los cátodos de bario y tungsteno los hacen adecuados para tareas de análisis de superficies de alta precisión.

5.3 Aplicaciones industriales y de comunicación

Los cátodos de tungsteno de bario admiten fuentes electrónicas de alta potencia y funciones de amplificación de señales en los campos industrial y de comunicación, satisfaciendo las necesidades de alta confiabilidad y eficiencia.

5.3.1 Sistema de radar

- **Introducción del equipo:** El sistema de radar detecta la posición y la velocidad del objetivo mediante la transmisión y recepción de señales de microondas, y se divide en radar militar (como radar de defensa aérea, radar de guía de misiles) y radar civil (como control de tráfico aéreo, radar meteorológico). Sus componentes principales incluyen una fuente de microondas (como un magnetrón o klistrón), una antena y un procesador de señal.
- **Principio de funcionamiento:** El haz de electrones emitido por el cátodo genera una señal de microondas de alta potencia en el tubo de microondas, que se refleja de nuevo al detector después de ser transmitida por la antena.
- **Acción del cátodo de tungsteno y bario:** Proporciona flujo de electrones de alta potencia y admite la generación de señales de microondas.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Salida de alta potencia:** se requiere una alta densidad de corriente para admitir la transmisión de señales de alta potencia.
 - o **Resistencia a la vibración:** Las plataformas móviles (como los radares de a bordo) requieren una alta resistencia mecánica de la matriz del cátodo.
 - o **Respuesta rápida:** El radar de pulsos debe iniciarse rápidamente por el cátodo y transmitirse de manera estable.
- **Ventajas técnicas:** La alta eficiencia de emisión y la robustez del cátodo de tungsteno de bario lo convierten en una fuente ideal de electrones para sistemas de radar.

5.3.2 Equipos de comunicación

- **Introducción del equipo:** Los amplificadores de estación base terrestre y de comunicación satelital se utilizan para la transmisión de señales de larga distancia, confiando en tubos de onda viajera o amplificadores de estado sólido para amplificar señales de alta frecuencia.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La comunicación por satélite es compatible con las redes de comunicación globales, y las estaciones base terrestres se utilizan para 5G y sistemas de radiodifusión.

Principio de funcionamiento: El haz de electrones emitido por el cátodo amplifica la señal de entrada en el tubo de onda viajera y emite una señal de alta potencia.

- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** Proporciona un flujo estable de electrones, lo que favorece la amplificación de la señal.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Estabilidad de alta frecuencia:** se requiere un flujo de electrones de bajo ruido y la capa activa del cátodo debe ser uniforme.
 - o **Larga vida útil:** La comunicación por satélite requiere una larga vida útil del cátodo y es necesario optimizar el rendimiento antienvenamiento y de evaporación.
- **Ventajas técnicas:** Los cátodos de tungsteno de bario admiten la amplificación de señales de alta frecuencia y el funcionamiento a largo plazo, cumpliendo con los requisitos de alta confiabilidad de los equipos de comunicación.

5.3.3 Tubo del interruptor de vacío

- **Introducción del equipo:** El tubo de interruptor de vacío es un dispositivo de conmutación de alto voltaje que se utiliza para disyuntores, distribución de energía y control de carga en sistemas de energía, logrando una conmutación rápida a través del control electrónico. Sus componentes principales incluyen un cátodo, un ánodo y una carcasa de vacío.

Principio de funcionamiento: El cátodo emite electrones, formando un arco o corriente encendida a alto voltaje para realizar la conmutación de circuitos.

- **Acción de cátodo de tungsteno de bario:** Proporciona flujo de electrones de alta corriente y admite una operación de conmutación rápida.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Alta densidad de corriente:** Requiere soporte para la operación de conmutación de alta corriente.
 - o **Resistencia al arco:** Es necesario evitar el arco causado por defectos superficiales y optimizar la topografía de la superficie.
- **Ventajas técnicas:** La alta eficiencia de emisión y la estabilidad de los cátodos de tungsteno de bario los hacen adecuados para aplicaciones de conmutación de alto voltaje y alta potencia.

5.4 Aeroespacial y Defensa

Los cátodos de tungsteno de bario admiten electrónica de alta confiabilidad y alto rendimiento en la industria aeroespacial y de defensa para satisfacer las demandas de entornos extremos.

5.4.1 Dispositivos electrónicos espaciales

- **Introducción del equipo:** Los dispositivos electrónicos espaciales incluyen módulos de comunicación, sistemas de propulsión e instrumentos científicos en sondas y satélites del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

espacio profundo, que necesitan operar en entornos extremos de vacío y radiación. Las aplicaciones típicas incluyen fuentes electrónicas para sistemas de comunicación por satélite (como satélites GPS) y sondas (como el rover de Marte).

Principio de funcionamiento: El cátodo proporciona flujo de electrones, lo que admite la amplificación de la señal de comunicación o la ionización del propulsor.

- **Acción de cátodo de tungsteno de bario:** Proporciona una fuente de electrones de alta confiabilidad para apoyar misiones espaciales a largo plazo.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Adaptabilidad a entornos extremos:** Necesita funcionar de manera estable en entornos de vacío espacial y radiación.
 - o **Larga vida:** El ciclo de la misión es de hasta varios años y el almacenamiento de bario debe optimizarse para prolongar la vida útil.
 - o **Bajo consumo de energía:** se requiere una baja potencia de calentamiento para ahorrar energía.
- **Ventajas técnicas:** La alta confiabilidad y la baja función de trabajo de los cátodos de tungsteno de bario los convierten en la opción preferida para aplicaciones espaciales.

5.4.2 Sistema electrónico de contramedidas

- **Introducción al equipo:** Los sistemas de contramedidas electrónicas utilizan señales de microondas de alta potencia para interferir o interrumpir las comunicaciones, radares o equipos electrónicos enemigos, incluidas las armas de microondas de alta potencia y los inhibidores. Su componente principal es una fuente de microondas (como un clostron o magnetrón).

Principio de funcionamiento: El haz de electrones emitido por el cátodo genera una señal de microondas de alta potencia que emite un objetivo interferente a través de una antena direccional.

- **Acción de cátodo de tungsteno de bario:** proporciona un flujo de electrones de ultra alta potencia y admite la generación de señales de microondas.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Potencia ultra alta:** Requiere una densidad de corriente extremadamente alta para admitir una salida de nivel MW.
 - o **Respuesta rápida:** La operación por pulsos requiere un arranque rápido y una emisión estable.
- **Ventajas técnicas:** Los cátodos de tungsteno de bario proporcionan un flujo estable de electrones bajo altos campos eléctricos y altas potencias, satisfaciendo las necesidades de los sistemas de contador.

5.5 Aplicaciones emergentes y entre dominios

Los cátodos de tungsteno de bario muestran un amplio potencial en campos tecnológicos emergentes, apoyando la investigación de vanguardia y las aplicaciones interdisciplinarias.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5.1 Generador de ondas de terahercios

- **Introducción del equipo:** El generador de ondas de terahercios genera ondas de terahercios para imágenes de terahercios (como seguridad, diagnóstico médico) y comunicación de alta velocidad. Sus componentes principales incluyen una fuente electrónica y un oscilador (como un tubo de onda viajera o un tubo klystron).
Principio de funcionamiento: El haz de electrones emitido por el cátodo oscila en un campo de alta frecuencia, generando ondas de terahercios.
- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** proporciona un haz de electrones de alta frecuencia y admite la generación de ondas de terahercios.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Respuesta de alta frecuencia:** Es necesario soportar una fuerte emisión de alto campo en combinación con el efecto de túnel.
 - o **Estabilidad:** Se requiere poco ruido a alto vacío y altas temperaturas.
- **Ventajas técnicas:** La baja función de trabajo y la alta densidad de corriente de los cátodos de tungsteno de bario los hacen adecuados para los altos requisitos de los generadores de ondas de terahercios.

5.5.2 Propulsores iónicos

- **Introducción del equipo:** Los propulsores iónicos son sistemas de propulsión espacial de bajo empuje y alta eficiencia que generan haces de iones a través de propulsores ionizantes (como el xenón) para proporcionar microempuje (niveles de μN a mN) para el control de actitud de sondas o satélites del espacio profundo.
Principio de funcionamiento: El cátodo emite propelente ionizante de electrones y los iones se expulsan después de que el campo eléctrico se acelera para generar empuje.
- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** proporciona una fuente de electrones de alta eficiencia y apoya la ionización del propelente.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Alta eficiencia:** se requiere un flujo de electrones eficiente para mejorar la eficiencia de ionización.
 - o **Larga vida:** Las misiones al espacio profundo requieren varios años de operación.
- **Ventajas técnicas:** La alta eficiencia de emisión y la larga vida útil del cátodo de bario-tungsteno respaldan el bajo consumo de energía y el funcionamiento a largo plazo del propulsor iónico.

5.5.3 Experimentos de física de altas energías

- **Descripción del dispositivo:** Los aceleradores de partículas, como el LHC del CERN, aceleran partículas cargadas a través de campos eléctricos y magnéticos para la investigación de física de alta energía. Su fuente de electrones se utiliza para generar un haz de partículas inicial o un haz auxiliar.
Principio de funcionamiento: El haz de electrones emitido por el cátodo se acelera y se inyecta en el acelerador para participar en el experimento de colisión de partículas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** Proporciona una fuente de electrones de alta corriente para apoyar la generación de haces de partículas.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Densidad de corriente ultra alta:** Necesidad de soportar haces de partículas de alta energía.
 - o **Estabilidad:** Necesita funcionar durante mucho tiempo bajo un vacío ultra alto.
- **Ventajas técnicas:** El alto rendimiento y la estabilidad de los cátodos de tungsteno de bario cumplen con las condiciones extremas de los experimentos de física de alta energía.

5.5.4 Aplicaciones biomédicas

- **Introducción del equipo:** El análisis de espectrometría de masas de alta precisión se utiliza para el diagnóstico de enfermedades (como la detección temprana del cáncer, la detección de enfermedades metabólicas) mediante la detección de la relación masa-carga de los biomarcadores. Su componente principal es la fuente de iones del espectrómetro de masas.
Principio de funcionamiento: El cátodo emite electrones para bombardear muestras biológicas, y los iones se generan y analizan mediante espectrometría de masas.
- **Acción del cátodo de tungsteno de bario:** Proporciona un flujo de electrones estable y admite ionización de alta sensibilidad.
- **Requisitos del cátodo:**
 - o **Alta sensibilidad:** requiere un flujo estable de electrones de baja energía.
 - o **Bajo nivel de ruido:** La precisión del análisis requiere un ruido de emisión muy bajo.
- **Ventajas técnicas:** Las características de alta sensibilidad y bajo ruido de los cátodos de tungsteno de bario los convierten en fuentes de electrones ideales para el análisis de espectrometría de masas biomédica.

En resumen, los cátodos de tungsteno de bario han mostrado una amplia gama de valores de aplicación en electrónica de vacío, instrumentos científicos, industria y comunicaciones, aeroespacial y defensa, y campos emergentes debido a su baja función de trabajo, alta densidad de corriente y excelente estabilidad. Este capítulo presenta en detalle los principios del equipo de cada escenario de aplicación y sus requisitos técnicos para los cátodos, aclara el papel clave de los cátodos de bario y tungsteno en la promoción del desarrollo de campos de alta tecnología y proporciona una referencia orientada a la aplicación para la posterior optimización del rendimiento y la investigación interdisciplinaria.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 6: Optimización y mejora del rendimiento del cátodo de bario y tungsteno

La optimización del rendimiento y la mejora de los cátodos de tungsteno de bario son clave para mejorar su rendimiento en la electrónica de vacío y las aplicaciones de alta tecnología, con el objetivo de mejorar la eficiencia de las emisiones, prolongar la vida útil, mejorar la adaptabilidad ambiental y permitir un diseño inteligente. Este capítulo analiza en detalle la optimización de la estructura de poros de la matriz de tungsteno poroso, la formulación de nuevos compuestos de bario, la aplicación de nanotecnología, procesos antitóxicos, mejoras de estabilidad térmica y mecánica, fabricación ecológica de bajo consumo y tecnologías de monitoreo inteligente, cubriendo una gama completa de estrategias desde el diseño de materiales hasta la optimización de procesos.

6.1 Mejorar la eficiencia del lanzamiento

Mejorar la eficiencia de emisión de los cátodos de tungsteno de bario es un objetivo central para optimizar su rendimiento, lo que implica aumentar la densidad de corriente de emisión, reducir la función de trabajo y mejorar la uniformidad de emisión de electrones. Esta sección analiza la optimización de la estructura de poros de la matriz de tungsteno porosa, la formulación y el dopaje de nuevos compuestos de bario y la aplicación de nanotecnología.

6.1.1 Optimización de la estructura de poros de la matriz de tungsteno porosa

La estructura de poros de la matriz porosa de tungsteno afecta directamente la velocidad de difusión de los átomos de bario y la eficiencia de formación de la capa activa, y la eficiencia de emisión se puede mejorar significativamente optimizando la porosidad y la conectividad.

- **Regulación de la porosidad:**
 - o **Objetivo de optimización:** Equilibrar el almacenamiento de compuestos de bario y la resistencia mecánica de la matriz ajustando la porosidad. La alta porosidad aumenta el almacenamiento de bario, lo que favorece la emisión de alta densidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de corriente. La baja porosidad mejora la resistencia para aplicaciones de larga duración.

- o **Método de proceso:** El polvo fino de tungsteno se mezcla con partículas más grandes para formar una distribución de poros bimodal y mejorar la conectividad. Los rellenos temporales, como las microesferas de poliestireno, se volatilizan durante la sinterización, creando una red de poros uniforme.
- o **Optimización de parámetros de sinterización:** Ajuste la temperatura de sinterización, la velocidad de calentamiento y la duración de mantenimiento para asegurarse de que las partículas se unan mientras retienen los poros. El vacío o la atmósfera de hidrógeno evitan la oxidación.
- **Conectividad de poros mejorada:**
 - o **Medios técnicos:** Al controlar la distribución del tamaño de partícula del polvo de tungsteno y presionar la presión, se forma una red de poros conectados tridimensional para promover la difusión de átomos de bario a la superficie.
 - o **Método de verificación:** La tomografía de rayos X (X-TAC) reconstruye la estructura de los poros para confirmar la conectividad; El método de presión de mercurio mide la porosidad y la distribución del tamaño de los poros.
- **Mejora del rendimiento:** la estructura de poros optimizada puede mejorar la eficiencia de difusión del bario, aumentar la cobertura de la capa superficial activa, reducir la función de trabajo y aumentar la densidad de corriente de transmisión.
- **Validación del proceso:** La microscopía electrónica de barrido (SEM) se utiliza para observar las secciones transversales de los poros, combinada con pruebas de emisión termotónicas para evaluar el rendimiento de la emisión y garantizar la uniformidad y la estabilidad.

La optimización de la estructura de los poros debe lograrse a través de procesos precisos de pulvimetalurgia y sinterización para proporcionar la base estructural para una emisión eficiente.

6.1.2 Formulación y tecnología de dopaje de nuevos compuestos de bario

Las nuevas formulaciones de compuestos de bario y las técnicas de dopaje optimizan la formación y estabilidad de la capa activa, reducen la función de trabajo y mejoran la eficiencia de las emisiones.

- **Nueva formulación de compuesto de bario:**
 - o **Ajuste de la fórmula:** El aluminato de calcio de bario tradicional ($4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 4:1:1) aumenta el contenido de bario ajustando la relación molar y acelera la tasa de liberación de bario libre, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta densidad de corriente. La baja proporción de bario ralentiza la descomposición y es adecuada para necesidades de larga duración.
 - o **Compuestos alternativos:** Explore los silicatos de bario (por ejemplo, Ba_2SiO_4) o los titanatos de bario (por ejemplo, BaTiO_3) como alternativas debido a sus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

propiedades de descomposición térmica más estables en un cierto rango de temperatura y reducen la interferencia de subproductos.

- o **Optimización de partículas:** Muela los compuestos de bario al nivel submicrónico para que coincidan con el tamaño de poro de la matriz, mejore la uniformidad de la impregnación y mejore la cobertura de la capa activa.
- **Tecnología de dopaje:**
 - o **Selección de dopantes:** Se agregaron óxidos de tierras raras (como La_2O_3 , CeO_2 , <2 % en peso) para mejorar la estabilidad térmica de la capa activa y reducir la función de trabajo. La_2O_3 forma complejos Ba-La-O con baja función de trabajo, y CeO_2 mejora la capacidad antioxidante.
 - o **Método de dopaje:** El dopante se mezcla con un compuesto de bario y se muele para preparar una suspensión, o se introduce a través de una impregnación secundaria después de la impregnación para garantizar una distribución uniforme. La dispersión ultrasónica evita la aglomeración.
 - o **Mecanismo de acción:** Los dopantes reducen la función de trabajo al cambiar la estructura electrónica de la superficie, al tiempo que inhiben la evaporación del bario y prolongan la vida útil de la capa activa.
- **Mejoras en el rendimiento:** Las nuevas formulaciones y técnicas de dopaje reducen la función de trabajo, aumentan la densidad de corriente de transmisión y mejoran la uniformidad de las emisiones.
- **Verificación del proceso:** Se utilizó espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) para analizar la composición química de la superficie y confirmar la distribución del dopante. Las pruebas de emisión termiónica verifican el aumento de la función de trabajo y la densidad de corriente.

Las nuevas formulaciones y técnicas de dopaje deben optimizarse experimentalmente para garantizar la compatibilidad con la estructura de poros de la matriz.

6.1.3 Aplicaciones de la nanotecnología

La nanotecnología mejora la eficiencia de emisión de los cátodos de bario-tungsteno mediante la construcción de estructuras a nanoescala, que involucran recubrimientos de bario a nanoescala y matrices de tungsteno nanoporosas.

- **Recubrimiento de bario a nanoescala:**
 - o **Método de preparación:** La deposición de capa atómica (ALD) o la deposición química de vapor (CVD) se utiliza para depositar recubrimientos de óxido de bario a nanoescala en la superficie de la matriz de tungsteno. ALD utiliza $\text{Ba}(\text{C}_3\text{H}_7\text{O}_2)_2$ como precursor y se deposita capa por capa a una determinada temperatura para garantizar la uniformidad.
 - o **Ventajas:** Los nanorecubrimientos aumentan la cobertura superficial de los átomos de bario, reducen la función de trabajo y reducen las pérdidas por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

evaporación de bario. La alta superficie específica del recubrimiento mejora la eficiencia de la emisión de electrones.

- o **Control del proceso:** La deposición debe realizarse en alto vacío para controlar la tasa de deposición y evitar que el recubrimiento sea demasiado grueso para bloquear los poros.
- **Matriz de tungsteno nanoporoso:**
 - o **Método de preparación:** Los nanoporos se forman en la superficie de la matriz de tungsteno mediante grabado electroquímico o métodos de plantilla (como plantillas de aluminio anodizado). El método de plantilla utiliza una plantilla de Al_2O_3 para eliminar la plantilla después de depositar tungsteno por deposición química de vapor mejorada con plasma (PECVD).
 - o **Ventajas:** Los nanoporos aumentan el área de superficie específica, mejoran el almacenamiento de bario y la eficiencia de difusión y mejoran la densidad de corriente de emisión.
 - o **Desafíos del proceso:** Los nanoporos necesitan mantener la conectividad para evitar el colapso; La resistencia de la matriz se ve reforzada por el dopaje con ZrO_2 .
- **Rendimiento mejorado:** La nanotecnología puede aumentar la eficiencia de las emisiones, reducir la función de trabajo y mejorar la uniformidad de las emisiones.
- **Método de verificación:** microscopía de fuerza atómica (AFM) para analizar la morfología del recubrimiento y confirmar la rugosidad; SEM y X-CT para detectar estructuras de nanoporos; Las pruebas de transmisión verifican el aumento de la densidad de corriente.

La nanotecnología necesita abordar el costo de preparación y la escalabilidad, pero su potencial para mejoras significativas en el rendimiento la convierte en un punto de acceso de investigación.

6.2 Prolongar la vida útil

Prolongar la vida útil es una dirección importante para la optimización del cátodo de bario y tungsteno, que implica procesos antienvenamiento y mejoras en la estabilidad térmica y la resistencia mecánica para ralentizar el envejecimiento y las fallas.

6.2.1 Proceso antienvenamiento

El proceso antienveneno ralentiza el envejecimiento de la capa activa al mejorar la resistencia del cátodo a los contaminantes ambientales.

- **Mecanismo de contaminación antioxidante:**
 - o **Fuentes de contaminación:** Los gases residuales (como O_2 , H_2O , CO_2) reaccionan con el bario superficial para formar compuestos funcionales de alta potencia (como BaO_2 , BaCO_3), lo que reduce el rendimiento de las emisiones.
 - o **Política de protección:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Agregue agentes antitóxicos** : Dopado con óxidos de tierras raras (como Sc_2O_3 , Y_2O_3) para formar una capa protectora e inhibir la reacción del bario con el oxígeno. Sc_2O_3 forma un complejo Ba-Sc-O estable que reduce la tasa de oxidación.
- **Recubrimiento de superficies**: Deposita una fina capa de óxido, como Al_2O_3 , a través de la deposición física de vapor (PVD) como barrera, evitando la penetración de contaminantes.
- **Tratamiento posterior** a la activación: Después de la activación, el recocido a baja temperatura forma una capa de adsorción de bario estable para mejorar la capacidad anticontaminación.
- **Optimización de procesos**:
 - o La impregnación y la activación se realizan en un vacío ultra alto para reducir la contaminación inicial.
 - o Utilice compuestos de bario de alta pureza y salas limpias para evitar la introducción de impurezas.
- **Mejora del rendimiento**: El proceso antienvenamiento extiende la vida útil del cátodo en un entorno de vacío y reduce la tasa de atenuación de la corriente transmitida.
- **Método de verificación**: XPS analiza la composición química de la superficie y detecta el contenido de contaminantes; Las pruebas de envejecimiento acelerado evalúan las propiedades antitoxicidad.

El proceso antienvenamiento requiere una combinación de medidas de protección para garantizar la estabilidad a largo plazo del cátodo en entornos no ideales.

6.2.2 Mejora de la estabilidad térmica y la resistencia mecánica

La estabilidad térmica mejorada y la resistencia mecánica reducen la evaporación del bario y la falla estructural durante la operación a alta temperatura, lo que prolonga la vida útil del cátodo.

- **Mejoras en la estabilidad térmica**:
 - o **Optimización de compuestos de bario**: Emplear compuestos de bario altamente estables térmicamente como Ba_2SiO_4 que se descomponen a una temperatura más alta que las formulaciones convencionales, lo que ralentiza la evaporación del bario.
 - o **Mejora del dopaje**: Se agrega ZrO_2 o HfO_2 a la matriz o capa activa para inhibir la volatilización de los átomos de bario a altas temperaturas y mejorar la fuerza de unión de la capa activa a la matriz.
 - o **Optimización del proceso de activación**: La activación paso a paso forma una capa activa uniforme, lo que reduce la pérdida de bario durante la activación a alta temperatura.
- **Mejora de la resistencia mecánica**:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Fortalecimiento de la matriz:** Mejore la unión del límite de grano de la matriz de tungsteno dopando Re o ThO₂ para mejorar la resistencia a la compresión.
- o **Optimización de sinterización:** Reduce la temperatura de sinterización y extiende el tiempo de retención de calor, lo que da como resultado enlaces de partículas más densos y microfisuras reducidas.
- o **Diseño de la estructura de poros:** La estructura de poros en gradiente (alta porosidad en la superficie, baja porosidad en el interior) equilibra la resistencia y las necesidades de almacenamiento de bario.
- **Mejora del rendimiento:** La estabilidad térmica mejorada extenderá la vida útil del cátodo a altas temperaturas; Mayor resistencia mecánica para soportar entornos de alta vibración (por ejemplo, radares militares).
- **Método de verificación:** Se utilizó el análisis termogravimétrico (TGA) para evaluar la tasa de evaporación del bario. Pruebas de compresión y SEM para observar la resistencia y la microestructura de la matriz; Las pruebas de vida verifican el rendimiento a largo plazo.

Las mejoras en la estabilidad térmica y la resistencia mecánica se logran mediante la optimización sinérgica de materiales y procesos.

6.3 Adaptabilidad ambiental

La mejora de la adaptabilidad ambiental de los cátodos de bario y tungsteno les permite operar en condiciones extremas y demandas de fabricación ecológicas, lo que implica un rendimiento ambiental extremo y diseños de baja potencia.

6.3.1 Rendimiento en entornos extremos

Los entornos extremos (por ejemplo, vacío espacial, alta radiación, ciclos de temperatura) imponen mayores exigencias al rendimiento del cátodo, lo que requiere materiales y estructuras optimizados para garantizar la estabilidad.

- **Vacío espacial y radiación:**
 - o **Estrategia de optimización:** Agregue aditivos antirradiación para mejorar la capacidad de daño antirradiación de la matriz y la capa activa. Superficie depositada con un recubrimiento de ZrO₂ para proteger las partículas radiantes.
 - o **Compatibilidad al vacío:** Activa y sella el cátodo en vacío ultra alto, reduciendo la contaminación por gases residuales.
- **Ciclo de temperatura:**
 - o **Estrategia de optimización:** Se utiliza una matriz de tungsteno con un bajo coeficiente de expansión térmica para reducir el estrés térmico. El calentamiento paso a paso evita el agrietamiento de la capa activa.
 - o **Método de verificación:** Las pruebas de ciclos térmicos evalúan la degradación del rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Entorno de alta vibración:**
 - o **Estrategia de optimización:** Forme una matriz de alta densidad mediante prensado isostático en frío para mejorar la resistencia a las vibraciones. El diseño de poros degradados mejora la tenacidad estructural.
- **Rendimiento mejorado:** El cátodo optimizado puede funcionar de manera estable en entornos de vacío, fuerte radiación y vibración, y la vida útil se prolonga.
- **Método de verificación:** Prueba de simulación ambiental (radiación, vacío, vibración) combinada con prueba de emisión para confirmar la estabilidad del rendimiento.

La optimización de entornos extremos requiere una consideración integral de los materiales, los procesos y el diseño estructural.

6.3.2 Bajo consumo de energía y fabricación ecológica

El bajo consumo de energía y la fabricación ecológica son direcciones importantes en el diseño moderno de cátodos, con el objetivo de reducir el consumo de energía y el impacto ambiental.

- **Diseño de bajo consumo:**
 - o **Temperatura de funcionamiento reducida:** la función de trabajo se reduce por dopaje Sc_2O_3 o La_2O_3 para que el cátodo proporcione una alta densidad de corriente a la temperatura de funcionamiento, reduciendo la potencia de calentamiento.
 - o **Estructura de calentamiento eficiente:** Diseñe una matriz de alta conductividad térmica con calentadores optimizados como el filamento Mo para mejorar la eficiencia térmica.
 - o **Método de verificación:** La prueba de emisión termiónica evalúa el rendimiento a baja temperatura; La termografía analiza la uniformidad del calentamiento.
- **Fabricación ecológica:**
 - o **Materiales ecológicos:** Utilice aditivos no tóxicos como el CeO_2 para reducir el daño ambiental. Recupere polvo de tungsteno y compuestos de bario para reducir el consumo de materias primas.
 - o **Proceso de ahorro de energía:** La sinterización a baja temperatura y la impregnación de alta eficiencia (inmersión al vacío) se utilizan para reducir el consumo de energía.
 - o **Tratamiento de residuos:** Establecer un sistema de recuperación de líquidos residuales compuestos de bario para recuperar iones Ba^{2+} a través de la precipitación química y reducir las emisiones.
- **Rendimiento mejorado:** el diseño de baja potencia reduce la potencia de calentamiento; Reducir el consumo de energía y las emisiones de residuos de la fabricación ecológica.
- **Método de verificación:** el análisis de consumo de energía evalúa la eficiencia operativa y de fabricación; La evaluación de impacto ambiental (ACV) confirma la eficacia de la fabricación ecológica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El bajo consumo de energía y la fabricación ecológica requieren un equilibrio entre el rendimiento y los beneficios ambientales.

6.4 Diseño inteligente

El diseño inteligente mejora el rendimiento del cátodo a través del monitoreo en tiempo real y los ajustes dinámicos, lo que implica la integración de sensores y el control adaptativo.

- **Monitoreo de sensores:**
 - o **Tipo de sensor:** Los sensores de temperatura en miniatura integrados (por ejemplo, termopares) y los sensores de corriente monitorean el estado del cátodo. Los sensores de presión detectan cambios en el entorno de vacío.
 - o **Método de instalación:** El sensor está incrustado en la matriz del cátodo o en la carcasa del dispositivo de vacío y transmite datos a través de un microcircuito.
 - o **Parámetros de monitoreo:** Registre la temperatura de funcionamiento, la corriente de transmisión y el vacío en tiempo real para predecir el envejecimiento o la contaminación de la capa activa.
- **Ajuste dinámico:**
 - o **Sistema de control:** Desarrolle un sistema de retroalimentación basado en una unidad de microcontrol (MCU) para ajustar la potencia de calentamiento o las condiciones de activación en función de los datos del sensor. Por ejemplo, cuando la corriente de emisión cae un $>5\%$, se activa la activación a baja temperatura del átomo de bario suplementario.
 - o **Algoritmos adaptativos :** utilice modelos de aprendizaje automático para analizar datos históricos, optimizar parámetros operativos y extender la vida útil.
- **Rendimiento mejorado:** el diseño inteligente prolonga la vida útil del cátodo y reduce las fallas accidentales.
- **Método de verificación:** Prueba de operación simulada para evaluar la precisión del sensor y la respuesta del sistema de control; El análisis de fallas confirma la efectividad de la inteligencia.

El diseño inteligente aborda la miniaturización de los sensores y la complejidad del procesamiento de datos, pero su potencial es significativo.

En resumen, la optimización del rendimiento y la mejora del cátodo de tungsteno de bario mejoran significativamente la eficiencia de emisión, la vida útil y la adaptabilidad ambiental a través de la optimización de la estructura de los poros, nuevas formulaciones, nanotecnología, proceso antienvenamiento, mejora de la estabilidad termomecánica, fabricación ecológica de bajo consumo y diseño inteligente. Este capítulo proporciona una ruta técnica sistemática para el desarrollo de cátodos de alto rendimiento, sentando las bases para los desafíos técnicos y el desarrollo futuro del próximo capítulo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Capítulo 7: Desafíos y desarrollo futuro

Como fuente de emisión termoiónica de alta eficiencia, el cátodo de bario y tungsteno ocupa una posición importante en el campo de los dispositivos electrónicos de vacío y la alta tecnología, pero su desarrollo enfrenta cuellos de botella técnicos como el costo del material, la consistencia del rendimiento y la estabilidad de la cadena de suministro, y también está bajo la presión competitiva de los cátodos fríos y otras tecnologías de cátodos calientes. Este capítulo proporciona un análisis en profundidad de los desafíos técnicos actuales, analiza el panorama competitivo de las tecnologías emergentes y espera futuras direcciones de investigación para los cátodos de bario-tungsteno, que cubren nuevos materiales y procesos, diseño inteligente e investigación interdisciplinaria.

7.1 Cuellos de botella técnicos actuales

La aplicación generalizada de cátodos de tungsteno de bario está limitada por cuellos de botella como el costo del material, la complejidad de la preparación, la consistencia del rendimiento y la estabilidad de la cadena de suministro, que limitan su competitividad en dispositivos de alto rendimiento y producción en masa.

7.1.1 Costo del material y complejidad de la preparación

- **Descripción del desafío:**
 - o **Materias primas de alto costo:** Los cátodos de tungsteno de bario se basan en compuestos de tungsteno y bario de alta pureza, que pueden ser costosos. El polvo de tungsteno debe tamizarse cuidadosamente para garantizar un tamaño de partícula uniforme, y los compuestos de bario deben sintetizarse con alta pureza, lo que aumenta significativamente los costos de material.
 - o **Procesos de preparación complejos:** El proceso de pulvimetalurgia de la matriz de tungsteno porosa (incluido el prensado y la sinterización a alta temperatura) y el proceso de impregnación y activación de compuestos de bario implican

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

operaciones de alta precisión de varios pasos. La sinterización a alta temperatura requiere un vacío estricto o una atmósfera inerte, la impregnación y la activación requieren un entorno limpio, inversión en equipos y alto consumo de energía.

- o **Sensibilidad del proceso:** Las pequeñas desviaciones en la porosidad, el empaquetamiento de bario y las condiciones de activación pueden afectar significativamente el rendimiento de las emisiones, lo que genera mayores costos de prueba y error.
- **Impacto:** El alto costo y la complejidad limitan la adopción de cátodos de tungsteno de bario en aplicaciones sensibles a los costos, como equipos de microondas residenciales, y elevan la barrera de entrada para las pequeñas y medianas empresas.
- **Solución potencial:**
 - o Explore materiales alternativos de bajo costo, como dopar metales de bajo precio como el molibdeno para reducir el uso de tungsteno, o adopte formulaciones de compuestos de bario más económicas.
 - o Optimice el flujo del proceso y simplifique los pasos de prensado y inmersión con equipos automatizados para reducir moderadamente el consumo de energía.
 - o Establezca especificaciones de proceso estandarizadas, combinadas con la tecnología de control estadístico de procesos (SPC), reduzca significativamente las fluctuaciones de los parámetros y mejore la eficiencia de la producción.

7.1.2 Consistencia del rendimiento y desafíos de producción en masa

- **Descripción del desafío:**
 - o **Variaciones de lote a lote:** La estructura de poros, el relleno del compuesto de bario y la uniformidad de la capa activa de la matriz de tungsteno porosa varían entre lotes, lo que provoca fluctuaciones en el rendimiento de las emisiones y afecta la confiabilidad del dispositivo.
 - o **Dificultad en el escalado del proceso:** La preparación de laboratorio a pequeña escala puede lograr una alta consistencia, pero en la producción a escala industrial, la uniformidad en las condiciones de prensado, sinterización e impregnación es difícil de mantener, lo que lleva a un rendimiento desigual.
 - o **Complejidad del control de calidad:** Las pruebas de rendimiento de emisiones requieren un entorno de alto vacío e instrumentos de precisión, lo que hace que el proceso de prueba sea lento y costoso. El análisis de fallas (como el diagnóstico de contaminación superficial) requiere una combinación de múltiples tecnologías, lo que aumenta la dificultad de la inspección de calidad.
- **Impacto:** El rendimiento inconsistente limita la credibilidad de los cátodos de tungsteno de bario en aplicaciones de alta confiabilidad (por ejemplo, comunicaciones satelitales, aceleradores de partículas) y dificulta la industrialización a gran escala.
- **Solución potencial:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o La introducción de tecnologías de monitoreo en línea, como la detección de la estructura de poros en tiempo real y el monitoreo de temperatura, mejora significativamente la estabilidad del proceso.
- o Desarrolle una plataforma de pruebas de alto rendimiento que combine pruebas de emisiones automatizadas y análisis de visión artificial para evaluar rápidamente la consistencia de los lotes.
- o Optimice los procesos de producción para garantizar lotes estables de materias primas y reducir significativamente la variabilidad del rendimiento a través de métodos basados en datos como Six Sigma.

7.1.3 Desafíos de la cadena de suministro

- **Descripción del desafío:**

- o **Escasez de materias primas:** Los recursos de tungsteno y bario son escasos, las reservas mundiales se concentran en unas pocas regiones y las cadenas de suministro son susceptibles a las fluctuaciones geopolíticas y del mercado.
- o **Logística y almacenamiento:** El polvo de tungsteno de alta pureza y los compuestos de bario requieren condiciones especiales de almacenamiento (humedad y oxidación), y el transporte de larga distancia puede introducir impurezas o aumentar los costos.
- o **Presiones ambientales y regulatorias:** La producción y eliminación de desechos de compuestos de bario involucran sustancias potencialmente tóxicas que requieren el cumplimiento de estrictas regulaciones ambientales, lo que aumenta los costos de cumplimiento.

- **Impacto:** La inestabilidad de la cadena de suministro puede provocar escasez de materias primas o fluctuaciones de precios, afectando los planes de producción y el control de costos, y limitando el proceso de industrialización.

- **Solución potencial:**

- o Desarrollar tecnología de recuperación de recursos para extraer tungsteno y bario de cátodos de desecho para reducir moderadamente la dependencia del mineral en bruto.
- o Establecer una cadena de suministro diversificada, cooperar con proveedores multinacionales y diversificar los riesgos geopolíticos.
- o Promover procesos químicos ecológicos, utilizar alternativas no tóxicas o tecnologías eficientes de tratamiento de líquidos residuales para cumplir con los requisitos de protección ambiental.

7.2 Competencia de tecnología emergente

Los cátodos de tungsteno de bario enfrentan la competencia de cátodos fríos y otras tecnologías de cátodos calientes, y su posición en el mercado depende de su capacidad para mantener sus ventajas técnicas y adaptarse a diversas necesidades de aplicación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.1 Tecnología de cátodo frío

- **Descripción de la tecnología competitiva:**
 - o **Cátodo de nanotubos de carbono (CNT):** Utilizando las características de emisión de campo de los nanotubos de carbono, emiten electrones a través de altos campos eléctricos sin calentamiento, ofreciendo las ventajas de bajo consumo de energía, respuesta rápida y miniaturización, lo que los hace adecuados para dispositivos electrónicos en miniatura como pantallas planas y fuentes de rayos X portátiles.
 - o **Otros cátodos de emisión de campo:** como el grafeno, los nanocables de óxido de zinc y los cátodos de matriz de vanguardia, se basan en el alto efecto de mejora del campo eléctrico de las nanoestructuras para proporcionar una alta densidad de corriente de emisión y se utilizan ampliamente en campos emergentes.
 - o **Potencial de aplicación:** Los cátodos fríos están reemplazando gradualmente a los cátodos calientes tradicionales en dispositivos miniaturizados y de baja potencia, amenazando algunos mercados para los cátodos de tungsteno de bario.
- **Desafíos competitivos:**
 - o **Ventaja de baja potencia:** El cátodo frío no requiere calentamiento, lo que reduce significativamente el consumo de energía, lo que lo hace adecuado para aplicaciones portátiles y ecológicas.
 - o **Costos de fabricación reducidos:** La tecnología de preparación de nanotubos de carbono y grafeno está cada vez más madura y el costo está disminuyendo gradualmente, lo que mejora la competitividad del mercado.
 - o **Limitaciones:** La densidad de corriente de emisión y la vida útil de los cátodos fríos son generalmente más bajas que las de los cátodos de tungsteno de bario, y la estabilidad de la emisión de campo es susceptible a la contaminación de la superficie, lo que aumenta la complejidad del diseño del dispositivo debido a los altos requisitos de campo eléctrico.
- **Estrategia de respuesta al cátodo de tungsteno y bario:**
 - o Mejore las ventajas de alta potencia y destaque la irremplazabilidad de los cátodos de tungsteno de bario en aplicaciones de alta densidad de corriente y larga vida útil (como tubos de microondas, tubos de rayos X).
 - o Desarrolle cátodos de bario-tungsteno de baja potencia para reducir la brecha de consumo de energía con cátodos fríos optimizando la función de trabajo y la temperatura de funcionamiento.
 - o Amplíe las áreas de alta confiabilidad, como la electrónica espacial, para mejorar la resistencia a la radiación y la vibración.

7.2.2 Otros cátodos térmicos

- **Descripción de la tecnología competitiva:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Cátodos de óxido:** Basados en recubrimientos de óxido de bario u óxido de estroncio, tienen un bajo costo y temperaturas de funcionamiento más bajas, lo que los hace adecuados para aplicaciones de baja potencia (como tubos pequeños), pero ofrecen poca resistencia a la toxicidad y longevidad.
- o **Cátodo de hexaboruro de lantano (LaB₆):** Proporciona emisión de electrones de alto brillo y es adecuado para microscopía electrónica de alta resolución, pero tiene una alta temperatura de funcionamiento y altos costos de preparación.
- o **Cátodos de tungsteno dopados:** como los cátodos de tungsteno dopados con renio o dopados con torio, adecuados para entornos de alta temperatura y alta resistencia, pero la eficiencia de emisión es menor que la de los cátodos de tungsteno de bario.
- **Desafíos competitivos:**
 - o **Compensación de costo versus rendimiento :** Los cátodos de óxido dominan el mercado de bajo costo pero tienen un rendimiento limitado; Los cátodos de LaB₆ compiten con los cátodos de bario-tungsteno en aplicaciones de alto brillo, pero con un mayor consumo y costo de energía.
 - o **Competencia específica de la aplicación:** Los cátodos de LaB₆ amenazan la cuota de mercado de los cátodos de bario-tungsteno en microscopía electrónica, mientras que los cátodos de óxido están ejerciendo presión sobre el mercado de gama baja.
- **Estrategia de respuesta al cátodo de tungsteno y bario:**
 - o Optimice la relación rendimiento-costo para reducir costos simplificando el proceso de preparación mientras mantiene una alta eficiencia de emisiones y beneficios de larga vida útil.
 - o Función mejorada de baja potencia y beneficios de estabilidad térmica para aplicaciones de alto rendimiento (por ejemplo, tubos de microondas, aceleradores de partículas).
 - o Explore diseños de cátodos compuestos que combinan los beneficios del óxido o LaB₆ para desarrollar cátodos versátiles.

7.2.3 Análisis de la ventaja competitiva de los cátodos de bario y tungsteno

- **Ventajas:**
 - o **Alta eficiencia de emisión:** la función de baja potencia y la alta densidad de corriente lo hacen excelente en electrónica de vacío de alta potencia.
 - o **Larga vida útil:** El almacenamiento de bario optimizado y el diseño antienvenamiento extienden significativamente el tiempo de actividad para requisitos de alta confiabilidad (por ejemplo, comunicaciones satelitales).
 - o **Madurez tecnológica:** Décadas de acumulación de procesos y una cadena de industrialización bien establecida aseguran su competitividad en los campos tradicionales.
- **Desventajas:**
 - o El mayor consumo de energía y los costos de preparación limitan su aplicación en mercados de baja potencia y bajo costo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o El rendimiento es sensible al medio ambiente y requiere estrictas condiciones de aspiración y limpieza.
- **Posicionamiento estratégico:**
 - o Consolide mercados de alta potencia y alta confiabilidad, como tubos de microondas, tubos de rayos X y electrónica espacial.
 - o Expandirse a campos emergentes (por ejemplo, fuentes de terahercios) a través de innovaciones tecnológicas (por ejemplo, nanotecnología, diseño de baja potencia).
 - o Desarrolle cátodos compuestos de campo caliente, combinados con las ventajas de bajo consumo de energía de los cátodos fríos, para mejorar la competitividad general.

7.3 Direcciones futuras de la investigación

El desarrollo futuro de los cátodos de tungsteno de bario debe superar los cuellos de botella existentes, adaptarse a las necesidades de las tecnologías emergentes, explorar nuevos materiales y procesos, diseño inteligente e investigación interdisciplinaria, y ampliar sus perspectivas de aplicación.

7.3.1 Exploración de nuevos materiales y procesos

- **Nuevos materiales:**
 - o **Materiales de matriz alternativos:** Desarrolle matrices de tungsteno dopadas con molibdeno o renio para reducir moderadamente los costos y mejorar la conductividad térmica y la resistencia mecánica. Explore los sustratos cerámicos o de carburo de tungsteno para mejorar la resistencia a la oxidación a alta temperatura.
 - o **Nuevos compuestos de bario:** Investigue nuevas formulaciones como silicato de bario o circonio de bario para optimizar las propiedades de descomposición térmica y la estabilidad, y reducir el impacto de los subproductos en las propiedades de emisión.
 - o **Aditivos funcionales:** Desarrollar nuevos agentes antitóxicos (como el óxido de escandio) para formar complejos de baja función de trabajo al tiempo que mejora la resistencia a la radiación.
- **Nuevo proceso:**
 - o **Tecnología de impregnación eficiente:** La impregnación electroquímica o mejorada con plasma mejora la uniformidad del relleno de compuestos de bario, lo que reduce significativamente el tiempo de proceso.
 - o **Sinterización a baja temperatura:** Reducción de la temperatura de sinterización mediante la adición de nanocatalizadores, reducción del consumo de energía y preservación de la estructura de los poros.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Fabricación aditiva:** Utiliza tecnología de impresión 3D para controlar con precisión las estructuras porosas de la matriz de tungsteno, mejorando la flexibilidad del diseño y la uniformidad de los poros.
- **Resultados esperados:** Los nuevos materiales y procesos pueden mejorar significativamente la eficiencia de las emisiones, reducir la función de trabajo y reducir moderadamente los costos de preparación.
- **Método de validación:** Se utilizaron microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) para analizar la microestructura y la química de la superficie del material, combinadas con pruebas de emisión termoiónica para evaluar la mejora del rendimiento.

7.3.2 Diseño de cátodos inteligente y adaptativo

- **Diseño inteligente:**
 - o **Integración de sensores:** Integrado con pequeños sensores de temperatura, corriente y vacío para monitorear el funcionamiento del cátodo en tiempo real y predecir tendencias de envejecimiento o contaminación.
 - o **Control dinámico:** Desarrolle un sistema de retroalimentación basado en una unidad de microcontrol para ajustar dinámicamente la potencia de calentamiento o las condiciones de activación en función de los datos en tiempo real, prolongando la vida útil.
 - o **Análisis de datos:** utilice modelos de aprendizaje automático para analizar datos operativos, optimizar los parámetros del proceso y mejorar significativamente la eficiencia operativa.
- **Diseño adaptativo:**
 - o **Adaptación ambiental:** Responde dinámicamente a la contaminación por gases residuales a través de modificaciones químicas superficiales, como recubrimientos de zirconia, lo que mejora la robustez ambiental.
 - o **Operación multimodo:** Desarrolle cátodos que admitan modos de alta y baja potencia, adaptándose a diversas necesidades de aplicaciones.
- **Resultado esperado:** El diseño inteligente extiende significativamente la vida útil del cátodo, reduce las fallas no planificadas y mejora la estabilidad operativa.
- **Método de verificación:** Evalúe la confiabilidad del sistema de control a través de una prueba de operación a largo plazo y verifique el efecto adaptativo en combinación con el análisis de fallas.

7.3.3 Investigación interdisciplinaria

- **Combinado con Inteligencia Artificial:**
 - o **Optimización de procesos:** Acelere la investigación y el desarrollo optimizando las formulaciones de compuestos de bario y las condiciones de activación con simulaciones de dinámica molecular impulsadas por IA.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Predicción del rendimiento:** La influencia de múltiples parámetros en el rendimiento de la emisión es analizada por la red neuronal, lo que acorta significativamente el período experimental.
- **Combinado con computación cuántica:**
 - o **Diseño de materiales:** Utilice la computación cuántica para simular la estructura electrónica de la interfaz bario-tungsteno y desarrollar materiales de función de trabajo ultrabaja.
 - o **Investigación sobre el mecanismo de emisión:** Explorar la contribución del efecto túnel cuántico a la emisión fuerte de alto campo y diseñar un cátodo compuesto de campo caliente.
- **Integración con otras disciplinas:**
 - o **Nanotecnología:** Combinar técnicas como la deposición de capas atómicas (ALD) para desarrollar capas activas a nanoescala para mejorar la eficiencia de las emisiones.
 - o **Biomédico:** Optimización del rendimiento de los cátodos de bario-tungsteno en espectrometría de masas de alta precisión para apoyar el diagnóstico de enfermedades.
 - o **Nueva energía:** Explorar su potencial en generadores de plasma, sirviendo a tecnologías de fusión nuclear o pilas de combustible.
- **Resultados esperados:** La investigación interdisciplinaria puede ampliar significativamente las perspectivas de aplicación de los cátodos de bario-tungsteno en los campos de las ondas de terahercios, los dispositivos cuánticos y las nuevas energías.
- **Método de verificación:** Validar nuevos materiales y procesos a través de experimentos conjuntos multidisciplinarios y evaluar el rendimiento entre dominios en combinación con pruebas de aplicación práctica.

En resumen, el desarrollo de cátodos de bario-tungsteno enfrenta desafíos como el costo del material, la consistencia del rendimiento, la estabilidad de la cadena de suministro y la competencia de las tecnologías emergentes, pero a través de la promoción sinérgica de nuevos materiales y procesos, el diseño inteligente y la investigación interdisciplinaria, su potencial en la electrónica de vacío de alto rendimiento y los campos emergentes sigue siendo amplio.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 8: Estándares de cátodo de tungsteno y bario

La estandarización es la clave para garantizar el rendimiento constante, la confiabilidad de fabricación y la seguridad ambiental de los cátodos de tungsteno de bario, proporcionando un marco técnico unificado para su aplicación en electrónica de vacío y campos de alta tecnología. Este capítulo analiza en detalle los estándares internacionales y de la industria (incluidos los estándares nacionales e industriales chinos), las especificaciones de los parámetros de rendimiento, los estándares de fabricación y control de calidad, y los estándares ambientales y de seguridad relacionados con los cátodos de tungsteno de bario.

8.1 Estándares internacionales y de la industria

La estandarización de los cátodos de tungsteno de bario se basa en organizaciones internacionales de normalización (por ejemplo, IEC, ISO), estándares nacionales chinos (GB) y estándares de la industria (por ejemplo, IEEE, MIL-STD, ASTM y estándares de la industria china) para proporcionar especificaciones uniformes para la selección de materiales, los procesos de fabricación y las pruebas de rendimiento.

8.1.1 Normas internacionales relacionadas con los cátodos de tungsteno de bario

- **IEC 60601-1 Equipo eléctrico médico - Parte 1: Requisitos generales para la seguridad básica y el rendimiento esencial**
 - o **Descripción:** Esta norma especifica los requisitos de seguridad y rendimiento para equipos eléctricos médicos, cubriendo las especificaciones de rendimiento para cátodos de tungsteno de bario en tubos de rayos X, como la densidad de corriente de emisión, la vida útil y los requisitos del entorno de vacío.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Idoneidad:** Adecuado para equipos de imágenes médicas (por ejemplo, escáneres de tomografía computarizada, máquinas de diagnóstico de rayos X), lo que garantiza que el cátodo proporcione una emisión de electrones estable a alta potencia, cumpliendo con las necesidades de precisión de imágenes y seguridad del paciente.
- o **Requisitos clave:** El cátodo debe proporcionar una alta densidad de corriente de transmisión, bajas fluctuaciones de corriente, mantener un alto vacío (menos de 10^{-6} Pa) en el entorno operativo para evitar envenenamientos y las pruebas de vida útil deben simular las condiciones de funcionamiento reales.
- o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben verificar el rendimiento del cátodo utilizando amperímetros y vacuómetros de alta precisión, y el proceso de prueba debe cumplir con las condiciones ambientales y de seguridad especificadas por la norma.
- **Vocabulario electrotécnico internacional IEC 60050**
 - o **Descripción:** Esta norma proporciona una definición uniforme de términos para el campo de la ingeniería eléctrica, incluidos términos técnicos para cátodos térmicos como cátodos de tungsteno de bario, como función de trabajo, corriente de emisión y capa activa.
 - o **Aplicabilidad:** Proporciona consistencia terminológica para el desarrollo, las pruebas y la documentación de cátodos de tungsteno de bario, lo que garantiza la comunicación transfronteriza y la precisión en la documentación técnica.
 - o **Requisitos clave:** La terminología debe estar claramente definida y se debe utilizar un vocabulario estándar en los informes de prueba y los manuales de productos para evitar ambigüedades.
 - o **Guía de implementación:** El personal de investigación y desarrollo y los fabricantes deben redactar documentación técnica basada en IEC 60050 para garantizar que la terminología esté estandarizada.
- **Sistemas de gestión de calidad ISO 9001 – Requisitos**
 - o **Descripción:** Esta norma especifica los requisitos de un sistema de gestión de calidad, guiando el control de calidad y la gestión de procesos en la producción de cátodos de tungsteno de bario.
 - o **Idoneidad:** Adecuado para la producción de cátodos de tungsteno de bario en NDT industriales e instrumentos científicos, lo que garantiza la consistencia de los lotes y la confiabilidad del producto.
 - o **Requisitos clave:** El entorno de producción debe cumplir con los estándares de sala limpia (por ejemplo, ISO Nivel 5), el equipo de prueba debe calibrarse regularmente y los registros de producción deben estar completos, cubriendo la fuente de materias primas y los parámetros del proceso.
 - o **Guía de implementación:** Los fabricantes con certificación ISO 9001 deben establecer un sistema integral de gestión de calidad y auditar regularmente los procesos para garantizar la consistencia de la producción.
- **ISO 20431 Tecnología de vacío - Calibración de vacuómetros**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Descripción:** Esta norma especifica el método de calibración para equipos de prueba (como vacuómetros) en un entorno de vacío, lo que garantiza la precisión de las pruebas de rendimiento del cátodo de tungsteno y bario.
- o **Aplicabilidad:** Adecuado para pruebas catódicas en entornos de alto vacío (como tubos de microondas, microscopios electrónicos) para garantizar resultados de medición confiables.
- o **Requisitos clave:** El vacuómetro debe calibrarse regularmente, el entorno de prueba debe mantener un vacío ultra alto (menos de 10^{-8} Pa) y la precisión de la medición debe cumplir con los requisitos estándar.
- o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben monitorear el entorno de prueba utilizando vacuómetros calibrados y registrar datos de calibración para respaldar la trazabilidad.
- **IEC 60335-2-24 Electrodomésticos y aparatos eléctricos similares - Seguridad - Parte 2-24: Requisitos particulares para aparatos de refrigeración, aparatos de helado y máquinas de hielo**
 - o **Descripción:** Aunque principalmente para electrodomésticos, algunos capítulos de esta norma tratan sobre los requisitos de seguridad de los cátodos térmicos en dispositivos electrónicos de vacío, que pueden aplicarse indirectamente al control del entorno operativo de los cátodos de bario y tungsteno.
 - o **Aplicabilidad:** Proporcione especificaciones de operación segura para cátodos de tungsteno de bario en equipos civiles (como equipos de calentamiento por microondas) para garantizar la estabilidad operativa.
 - o **Requisitos clave:** El cátodo debe funcionar en un entorno de alta temperatura y vacío para evitar la descarga del arco y la volatilización del material.
 - o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben diseñar un sistema de sellado al vacío para garantizar que el entorno operativo del cátodo cumpla con los requisitos estándar.
- **ISO 19444-1 Tecnología de vacío - Métodos estándar para medir el rendimiento del sistema de vacío - Parte 1: Requisitos generales**
 - o **Descripción:** Esta norma especifica los métodos de prueba de diseño y rendimiento para sistemas de vacío y es aplicable a la gestión del entorno operativo del cátodo de tungsteno de bario.
 - o **Aplicabilidad:** Guíe el diseño de sistemas de vacío en tubos de microondas y tubos de rayos X, asegurando un rendimiento estable de los cátodos de tungsteno de bario en entornos de alto vacío.
 - o **Requisitos clave:** Los sistemas de vacío deben mantener una tasa de fuga baja (menos de 10^{-9} Pa·m³/s) y el método de prueba debe estandarizarse.
 - o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben verificar regularmente el rendimiento del sistema con bombas de vacío y tecnologías de sellado que cumplan con los estándares.

8.1.2 Normas industriales relacionadas con los cátodos de tungsteno de bario

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Definiciones estándar IEEE 161 de términos para tubos de electrones**
 - o **Descripción:** Esta norma define términos en electrónica de vacío, incluidos parámetros de rendimiento como la función de trabajo, la densidad de corriente de emisión y la estabilidad térmica.
 - o **Aplicabilidad:** Proporciona especificaciones terminológicas para la evaluación del rendimiento de cátodos de bario-tungsteno en tubos de microondas (por ejemplo, magnetrones, tubos de ondas viajeras) y sistemas de radar, especialmente para aplicaciones de alta potencia y alta frecuencia.
 - o **Requisitos clave:** El cátodo debe proporcionar un rendimiento de emisión estable dentro de un rango de temperatura específico, la prueba debe simular condiciones de pulso de alta frecuencia para verificar las capacidades de respuesta rápida y la resistencia a la vibración debe cumplir con los estándares.
 - o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben validar el rendimiento del cátodo con equipos de prueba recomendados por IEEE, como plataformas de prueba de alta frecuencia, para garantizar el cumplimiento de los requisitos de los equipos de comunicación y radar.
- **Estándar IEEE 287 para métodos de prueba de tubos de microondas**
 - o **Descripción:** Esta norma especifica los métodos de prueba para cátodos en tubos de microondas, incluidas las pruebas para el rendimiento de emisión, la vida útil y la idoneidad ambiental de los cátodos de tungsteno de bario.
 - o **Aplicabilidad:** Adecuado para dispositivos de microondas de alta potencia (como magnetrones, quilystrums), lo que garantiza un funcionamiento estable de los cátodos en condiciones de alta frecuencia y alta potencia.
 - o **Requisitos clave:** Las pruebas deben realizarse en un entorno de alto vacío, simulando pulsos o modos de operación continua para verificar la densidad y estabilidad de la corriente transmitida.
 - o **Orientación para la implementación:** Se deben utilizar instrumentos de alta precisión (por ejemplo, amperímetros, analizadores de espectro) para los procedimientos de prueba, y los datos registrados deben ajustarse a los formatos estándar.
- **MIL-STD-810 Consideraciones de ingeniería ambiental y pruebas de laboratorio**
 - o **Descripción:** Esta norma especifica los métodos de prueba para dispositivos electrónicos en entornos extremos (por ejemplo, alta vibración, radiación, ciclos de temperatura) y cubre los requisitos de rendimiento de los cátodos de tungsteno de bario.
 - o **Idoneidad:** Los cátodos de tungsteno de bario son adecuados para los sectores aeroespacial y de defensa, como las comunicaciones por satélite y los sistemas de contramedidas electrónicas, lo que garantiza su fiabilidad en entornos exigentes.
 - o **Requisitos clave:** El cátodo debe mantener un rendimiento estable en entornos de alta radiación y ultra alto vacío, la prueba de vida debe cubrir condiciones de operación y estrés ambiental a largo plazo, y la resistencia mecánica debe cumplir con los estándares de resistencia al impacto.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Guía de implementación:** Los proveedores deben realizar pruebas de simulación ambiental (por ejemplo, agitadores, exposición a la radiación) para garantizar que el cátodo cumpla con los estándares militares.
- **Estándar de método de prueba MIL-STD-202 para piezas de componentes electrónicos y eléctricos**
 - o **Descripción:** Esta norma especifica métodos de prueba para componentes electrónicos, incluidas pruebas de vida útil, confiabilidad e idoneidad ambiental de los cátodos de tungsteno de bario.
 - o **Aplicabilidad:** Adecuado para cátodos de tungsteno de bario en aplicaciones militares y aeroespaciales, lo que garantiza su estabilidad de rendimiento en condiciones extremas.
 - o **Requisitos clave:** La prueba debe simular el entorno operativo real, evaluar el rendimiento de las emisiones y las características de envejecimiento del cátodo, y los datos deben registrarse en detalle para respaldar el análisis de confiabilidad.
 - o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben usar equipos de prueba estandarizados junto con pruebas de envejecimiento acelerado para verificar el rendimiento a largo plazo de los cátodos.
- **ASTM F83 Práctica estándar para la definición y determinación de constantes termoiónicas de emisores de electrones**
 - o **Descripción:** Esta norma define las constantes termoiónicas de los emisores termoiónicos (por ejemplo, función de trabajo, densidad de corriente de emisión) y especifica los métodos de medición.
 - o **Idoneidad:** Directamente aplicable a las pruebas de rendimiento de cátodos de tungsteno de bario, especialmente en dispositivos electrónicos de alta potencia.
 - o **Requisitos clave:** La prueba debe realizarse en un entorno de alto vacío utilizando equipos de prueba de emisión termoiónica estandarizados.
 - o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben diseñar sus procesos de prueba con referencia a estándares para garantizar la precisión y repetibilidad de los resultados de medición.
- **Definiciones estándar IEEE C37.30 para aparata de alta tensión**
 - o **Descripción:** Esta norma define la terminología y los requisitos de prueba para componentes electrónicos en aparata de alto voltaje, parcialmente aplicable a cátodos de bario-tungsteno en aparata de vacío.
 - o **Aplicabilidad:** Guiar la evaluación del rendimiento de los cátodos en los tubos de los interruptores de vacío, asegurando su estabilidad en entornos de alto voltaje.
 - o **Requisitos clave:** El cátodo debe proporcionar una emisión de electrones estable en un entorno de alto voltaje y alto vacío, y la prueba debe simular las condiciones de pulso de conmutación.
 - o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben utilizar plataformas de prueba de alto voltaje para verificar el rendimiento del cátodo y el cumplimiento de los requisitos estándar.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GB 4943.1-2022 Equipos de tecnología de la información - Seguridad - Parte 1: Requisitos generales**

- o **Descripción:** Esta norma nacional china se basa en IEC 62368-1: 2018 y especifica los requisitos de seguridad para los equipos de tecnología de la información, incluido el rendimiento de seguridad eléctrica y térmica de dispositivos electrónicos como cátodos de tungsteno de bario.
- o **Aplicabilidad:** Es adecuado para el diseño de seguridad y la prueba de cátodos de tungsteno de bario en equipos de tecnología de la información (como microscopios electrónicos, tubos de vacío).
- o **Requisitos clave:** El cátodo debe cumplir con los requisitos de aislamiento eléctrico y estabilidad térmica, y el entorno operativo debe evitar la formación de arcos eléctricos y el sobrecalentamiento.
- o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben enviar muestras de cátodos a un laboratorio certificado por CCC para realizar pruebas para garantizar el cumplimiento de los estándares y completar las renovaciones de certificación antes del 1 de agosto de 2023.

- **GB / T 3797-2016 Condiciones ambientales para productos eléctricos y electrónicos - Parte 2: Métodos de prueba**

- o **Descripción:** Este estándar de la industria china especifica métodos de prueba ambiental para productos eléctricos y electrónicos, incluyendo pruebas de alta temperatura, alta humedad y vibración, adecuadas para la verificación del rendimiento de cátodos de bario y tungsteno.
- o **Aplicabilidad:** Guía las pruebas de rendimiento de cátodos de tungsteno de bario en entornos extremos, como aplicaciones en equipos de radar y aeroespaciales.
- o **Requisitos clave:** El cátodo debe mantener la estabilidad de emisiones a altas temperaturas ($\leq 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) y entornos de alto vacío, y la resistencia a la vibración debe cumplir con los estándares.
- o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben utilizar equipos de pruebas ambientales (como agitadores, termocicladores) para verificar el rendimiento del cátodo y cumplir con los requisitos estándar.

- **JB / T 6842-2018 Especificación general para dispositivos de electrones de vacío**

- o **Descripción:** Este estándar chino de la industria de maquinaria especifica los requisitos técnicos generales y los métodos de prueba para dispositivos electrónicos de vacío (como tubos de microondas que contienen cátodos de tungsteno de bario, tubos de rayos X).
- o **Aplicabilidad:** Es adecuado para pruebas de rendimiento y confiabilidad de cátodos de tungsteno de bario en electrónica de vacío.
- o **Requisitos clave:** El cátodo debe cumplir con los requisitos de densidad de corriente de emisión, vida útil y nivel de vacío, y la prueba debe simular las condiciones reales de funcionamiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben verificar el rendimiento del cátodo utilizando equipos de prueba estandarizados, como plataformas de prueba de alto vacío, para garantizar el cumplimiento de los requisitos de la industria.

8.2 Especificación de los parámetros de rendimiento del cátodo de tungsteno de bario

Las especificaciones de parámetros de rendimiento proporcionan criterios cuantitativos para la evaluación y aplicación de cátodos de bario y tungsteno, que cubren la definición de parámetros clave y métodos de prueba.

8.2.1 Requisitos de normalización para los parámetros clave

- **Densidad de corriente de emisión:**
 - o **Definición:** El flujo de electrones emitido por la superficie del cátodo por unidad de área, que refleja la eficiencia de emisión del cátodo.
 - o **Requisitos estándar:** Los dispositivos de alta potencia (como los tubos de tacylstron) deben satisfacer las necesidades de alta densidad de corriente con bajas fluctuaciones, según ASTM F83 y JB / T 6842-2018.
 - o **Aplicaciones típicas:** Los tubos de microondas requieren una alta densidad de corriente de transmisión para soportar una salida de alta potencia; Los microscopios electrónicos requieren poco ruido para garantizar la precisión de las imágenes.
- **Función de trabajo:**
 - o **Definición:** La energía mínima requerida para que los electrones escapen de la superficie del cátodo, determinando la eficiencia de emisión y la temperatura de funcionamiento.
 - o **Requisitos estándar:** La función de trabajo debe ser lo más baja posible para reducir la potencia de calentamiento mientras se mantiene la estabilidad de acuerdo con ASTM F83.
 - o **Aplicaciones típicas:** Las funciones de baja potencia son adecuadas para aplicaciones de baja potencia (por ejemplo, electrónica espacial).
- **Vida útil:**
 - o **Definición:** El tiempo para que el cátodo mantenga una emisión estable en condiciones específicas (por ejemplo, temperatura, vacío).
 - o **Requisitos estándar:** Las aplicaciones de larga duración (por ejemplo, comunicaciones satelitales) deben satisfacer las necesidades de aplicaciones de larga duración, largos tiempos de operación y degradación de bajo rendimiento de acuerdo con los estándares MIL-STD-202 y JB / T 6842-2018.
 - o **Aplicaciones típicas:** Los dispositivos de radar y espaciales requieren una larga vida útil para reducir los costos de mantenimiento.
- **Guía de implementación:** Los fabricantes deben seleccionar el rango de parámetros apropiado para el escenario de aplicación, como alta potencia o alta confiabilidad, y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desarrollar especificaciones de prueba con referencia a las normas IEC 60601-1, IEEE 287, ASTM F83 y JB / T 6842-2018.

8.2.2 Métodos de prueba y procesos de verificación

- **Prueba de porosidad de matriz de tungsteno poroso:**
 - o **Métodos:** La porosidad y la distribución del tamaño de los poros se midieron mediante una barrera de mercurio o una tomografía de rayos X (X-CT) para garantizar la conectividad de los poros y la capacidad de almacenamiento de bario.
 - o **Requisitos estándar:** La porosidad debe ser uniforme y la distribución del tamaño de los poros debe ser moderada para equilibrar la eficiencia de emisión y la resistencia mecánica, de acuerdo con **la Guía estándar ASTM E1441 para imágenes de tomografía computarizada (TC) y GB/T 21650.1-2008 Distribución del tamaño de los poros y porosidad de materiales sólidos mediante porosimetría de mercurio y adsorción de gases - Parte 1: Porosimetría de mercurio**
 - o **Proceso de validación:** Reconstruya la estructura de poros utilizando X-CT de alta resolución (resolución mejor que 1 μm) y analice la sección de poros en combinación con SEM para confirmar la conectividad.
- **Prueba de impregnación:**
 - o **Métodos:** El empaquetamiento del compuesto de bario se midió mediante análisis termogravimétrico (TGA) o titulación química para evaluar la uniformidad de la impregnación.
 - o **Requisitos estándar:** Los compuestos de bario deben llenar bien los poros y tener una alta cobertura de capa activa superficial, de acuerdo con **ASTM E168 Prácticas estándar para técnicas generales de análisis termogravimétrico y GB / T 13247-2019 Métodos de prueba para análisis térmico de materiales metálicos**
 - o **Proceso de validación:** Analice la química de la superficie en combinación con XPS para confirmar la uniformidad de la distribución de átomos de bario.
- **Prueba de rendimiento transmitido:**
 - o **Métodos:** La densidad de corriente y la función de trabajo se midieron utilizando un dispositivo de prueba de emisión termoiónica en un entorno de alto vacío (menos de 10^{-6} Pa).
 - o **Requisitos estándar:** Las pruebas deben simular condiciones operativas del mundo real (como el modo pulsado o continuo) para garantizar resultados confiables de conformidad con las normas ISO 20431, ASTM F83 y JB / T 6842-2018.
 - o **Proceso de validación:** Utilizando un amperímetro de alta precisión (precisión superior a 0,1 mA) y un vacuómetro, registre las fluctuaciones de corriente de transmisión y los parámetros ambientales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Guía de implementación:** El equipo de prueba debe calibrarse regularmente, el entorno de prueba debe cumplir con las normas ISO 20431 y GB / T 3797-2016, y el registro de datos debe detallarse para respaldar la trazabilidad.

8.3 Estándares de control de calidad y fabricación de cátodos de tungsteno y bario

Los estándares de fabricación y control de calidad garantizan una producción constante y confiable de cátodos de tungsteno de bario, cubriendo la pureza del material, las especificaciones del proceso y los requisitos de trazabilidad.

8.3.1 Especificaciones para la pureza del material y el proceso de preparación

- **Pureza del material:**
 - **Estándar:**
 - **Especificación estándar ASTM B760 para placas, láminas y láminas de tungsteno**
 - **Descripción:** Se especifican los requisitos de pureza de los materiales de tungsteno (mejor que el 99,95%) y el control de impurezas, y son adecuados para la preparación de matriz de tungsteno porosa para cátodos de tungsteno de bario.
 - **Aplicabilidad:** Garantice una alta pureza del polvo de tungsteno, reduciendo el impacto de las impurezas (por ejemplo, Fe, C) en las propiedades de emisión.
 - **GB / T 4181-2017 Métodos para el análisis químico de tungsteno y aleaciones de tungsteno**
 - **Descripción:** Los métodos de análisis químico para tungsteno y aleaciones de tungsteno se especifican para verificar la pureza y el contenido de impurezas del polvo de tungsteno.
 - **Aplicabilidad:** Garantice la calidad de las materias primas para la matriz de tungsteno de cátodo de tungsteno de bario y evite la contaminación por impurezas.
 - **ASTM D3171 Métodos de prueba estándar para el contenido constituyente de materiales compuestos, adaptados para compuestos de bario**
 - **Descripción:** Guíe el análisis químico de compuestos de bario, como el aluminato de calcio de bario, asegurando que no haya contaminación por impurezas.
 - **Aplicabilidad:** Asegura la pureza de los compuestos de bario, evitando la contaminación de la superficie y la degradación de las propiedades de emisión.
 - **ASTM E1479 Práctica estándar para describir y especificar espectrómetros de emisión atómica de plasma acoplados inductivamente**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Descripción:** Los métodos de análisis ICP-OES se especifican para verificar la pureza del polvo de tungsteno y los compuestos de bario.
- **Aplicabilidad:** Garantiza la precisión en el análisis de materias primas, lo que respalda la producción de cátodos de alta calidad.
- **GB / T 4325-2013 Métodos para el análisis químico de molibdeno y aleaciones de molibdeno, adaptados para tungsteno**
 - **Descripción:** Proporciona métodos de análisis químico para molibdeno y metales refractarios relacionados para la verificación de la pureza de materiales a base de tungsteno.
 - **Aplicabilidad:** Apoyar el control de calidad de la matriz de tungsteno catódico de tungsteno de bario.
- **Método de verificación:** Confirme la pureza del material mediante espectroscopia de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, según ASTM E1479 y GB / T 4181-2017) o espectrometría de masas.
- **Importancia:** Los materiales de alta pureza reducen significativamente el riesgo de contaminación de la superficie y garantizan un rendimiento de emisión estable.
- **Especificaciones del proceso de preparación:**
 - **Estándar:**
 - **Especificación estándar ASTM B387 para barras, varillas y alambres de aleación de molibdeno y molibdeno, adaptada para el procesamiento de tungsteno**
 - **Descripción:** Guiar los procesos de cribado, prensado y sinterización del polvo de tungsteno, especificando la distribución del tamaño de las partículas y las condiciones de sinterización.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para procesos de pulvimetalurgia con matrices porosas de tungsteno, asegurando porosidad y resistencia mecánica.
 - **Especificación estándar ASTM F288 para alambre de tungsteno para dispositivos electrónicos y lámparas**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos de mecanizado para materiales a base de tungsteno en dispositivos electrónicos, incluidas las condiciones de prensado y sinterización a alta temperatura.
 - **Aplicabilidad:** Guíe la preparación de la matriz de tungsteno para cátodos de tungsteno de bario para garantizar una estructura de poros uniforme.
 - **Especificación estándar ASTM B689 para recubrimientos galvanizados de tungsteno**
 - **Descripción:** Guía el proceso de tratamiento superficial y recubrimiento de la matriz de tungsteno, adecuado para la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

preparación previa a la impregnación de cátodos de tungsteno de bario.

- **Aplicabilidad:** Asegura una superficie plana de la matriz de tungsteno y optimiza el efecto de impregnación de los compuestos de bario.
- **Práctica estándar ASTM E925 para monitorear la calibración de equipos de pulvimetalurgia**
 - **Descripción:** Especifica los métodos de calibración y prueba de porosidad para equipos de pulvimetalurgia para garantizar una preparación consistente de equipos de matriz de tungsteno.
 - **Aplicabilidad:** Guíe los procesos de prensado y sinterización de la matriz de tungsteno porosa y optimice la estructura de los poros.
- **GB / T 3461-2017 Polvo de tungsteno**
 - **Descripción:** Especifica la distribución del tamaño de partícula, la pureza y los requisitos de procesamiento del polvo de tungsteno, y es adecuado para el proceso de pulvimetalurgia del cátodo de tungsteno de bario.
 - **Aplicabilidad:** Garantizar la calidad del polvo de tungsteno y optimizar la preparación de la matriz de tungsteno porosa.
- **GB / T 4192-2010 Tungsteno sinterizado y aleación de tungsteno**
 - **Descripción:** Se especifican los requisitos del proceso y los métodos de prueba de rendimiento de los espacios en blanco de sinterización de tungsteno y aleaciones de tungsteno, y son adecuados para el proceso de sinterización de cátodos de bario y tungsteno.
 - **Aplicabilidad:** Guíe el proceso de sinterización a alta temperatura, asegurando la porosidad y la resistencia mecánica de la matriz porosa de tungsteno.

o **Requisitos del proceso:**

- **Pulvimetalurgia:** El cribado de polvo de tungsteno debe controlar la distribución del tamaño de las partículas (de acuerdo con GB / T 3461-2017), el prensado y la sinterización deben realizarse en una atmósfera de vacío o hidrógeno para evitar la oxidación, y la temperatura de sinterización debe controlarse con precisión (1900-2050 °C, de acuerdo con GB / T 4192-2010).
- **Proceso de impregnación:** La solución de compuesto de bario debe formularse de manera uniforme y la impregnación debe completarse en un entorno de alto vacío para garantizar un llenado uniforme.
- **Proceso de activación:** La temperatura del tratamiento térmico debe controlarse con precisión y el proceso de tratamiento térmico se monitorea de acuerdo con las normas ASTM E168 y GB / T 13247-2019.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Método de verificación:** La temperatura de sinterización se monitorea con un termómetro infrarrojo, y la morfología y la composición química de la capa activa se analizan mediante SEM y XPS de acuerdo con las normas ASTM E168, ASTM E1441, ASTM E925 y GB / T 4192-2010.
- o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben establecer procedimientos operativos estándar (SOP) que utilicen equipos automatizados para reducir los errores manuales y garantizar la repetibilidad del proceso con referencia a ISO 9001, ASTM B760, B387, F288, B689, GB / T 3461-2017 y GB / T 4192-2010.

8.3.2 Requisitos de coherencia y trazabilidad

- **Requisitos de conformidad:**

- o **Estándar:**

- **ISO 10012 Sistemas de gestión de medición - Requisitos para procesos de medición y equipos de medición**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos de gestión para equipos y procesos de medición, asegurando la consistencia y confiabilidad de los datos de prueba.
 - **Idoneidad:** Adecuado para pruebas de porosidad, densidad de corriente de emisión y vida útil de cátodos de tungsteno de bario, lo que garantiza un rendimiento constante de un lote a otro.
 - **ASTM E691 Práctica estándar para realizar un estudio entre laboratorios para determinar la precisión de un método de prueba**
 - **Descripción:** Guiar la evaluación de la repetibilidad y reproducibilidad de los métodos de prueba, asegurando la consistencia en los resultados de las pruebas de rendimiento catódico.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para la estandarización del rendimiento de emisiones y las pruebas de porosidad, reduciendo las fluctuaciones de lote a lote.
 - **Directrices ISO 11462 para la implementación del control estadístico de procesos**
 - **Descripción:** Guiar la implementación del Control Estadístico de Procesos (SPC), monitoreando parámetros clave en el proceso de producción.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para procesos de prensado, sinterización e impregnación de cátodos de tungsteno de bario, lo que reduce las fluctuaciones de rendimiento.
 - **Guía estándar ASTM E2782 para el análisis de sistemas de medición**
 - **Descripción:** Guiar el análisis y la optimización de los sistemas de medición, asegurando la consistencia y confiabilidad de los datos de prueba.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Aplicabilidad:** Adecuado para la calibración de instrumentos y el análisis de datos para pruebas de rendimiento catódico.
- **GB/T 19022-2003 Sistemas de gestión de medición - Requisitos para procesos de medición y equipos de medición**
 - **Descripción:** El estándar de la industria china, equivalente a ISO 10012, especifica los requisitos de gestión para los equipos y procesos de medición, lo que garantiza la consistencia de las pruebas.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para la gestión de instrumentos y la verificación de datos para pruebas de rendimiento catódico de tungsteno y bario.
- o **Objetivo:** Garantizar una porosidad constante, la densidad de corriente de transmisión y la vida útil en lotes de cátodos con bajas fluctuaciones de rendimiento.
- o **Métodos:** Se utilizó el control estadístico del proceso (SPC, de acuerdo con ISO 11462 y GB/T 19022-2003) para monitorear los parámetros clave del proceso (por ejemplo, presión de prensado, temperatura de sinterización) y verificar el rendimiento del lote a través de pruebas de alto rendimiento de acuerdo con las normas ASTM E691 y E2782.
- o **Proceso de verificación:** Las desviaciones de los parámetros se analizan utilizando gráficos de control, combinados con pruebas de emisiones para evaluar la consistencia de los lotes de acuerdo con las normas IEEE 287, ASTM E691, E2782 y GB/T 19022-2003.
- **Requisitos de trazabilidad:**
 - o **Estándar:**
 - **Sistemas de gestión de calidad ISO 9001 – Requisitos**
 - **Descripción:** Requiere el establecimiento de un sistema de registro de producción rastreable, que cubra todo el proceso, desde la adquisición de materias primas hasta las pruebas del producto terminado.
 - **Aplicabilidad:** Garantice la trazabilidad de los problemas de producción de cátodos de tungsteno y bario, facilitando la mejora de la calidad y el análisis de fallas.
 - **ISO/IEC 17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos de trazabilidad para las pruebas de laboratorio y las calibraciones, lo que garantiza la precisión y fiabilidad de los datos de las pruebas.
 - **Idoneidad:** Adecuado para el registro de datos para pruebas de rendimiento catódico y control de calidad.
 - **ASTM E2554 Práctica estándar para estimar y monitorear la incertidumbre de los resultados de las pruebas**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Descripción:** Orientar la evaluación de la incertidumbre y la gestión de datos de los resultados de las pruebas, asegurando la trazabilidad.
- **Idoneidad:** Adecuado para pruebas de rendimiento y gestión de registros de calidad de cátodos de tungsteno de bario.
- **GB / T 27025-2019 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de prueba y calibración**
 - **Descripción:** El estándar de la industria china, equivalente a ISO/IEC 17025, especifica los requisitos de trazabilidad de datos para los laboratorios de prueba y calibración.
 - **Aplicabilidad:** Es adecuado para la gestión de datos y la verificación de pruebas de rendimiento del cátodo de tungsteno con bario.
- o **Objetivo:** Registrar todos los datos del proceso, desde la adquisición de materias primas hasta las pruebas del producto terminado, asegurando que se puedan rastrear los problemas.
- o **Método:** Se estableció un sistema de registro de producción electrónico, que cubre lotes de materias primas, parámetros de proceso y resultados de pruebas, de conformidad con los requisitos de ISO 9001, ISO / IEC 17025, ASTM E2554 y GB / T 27025-2019.
- o **Proceso de verificación:** audite regularmente los registros para garantizar la integridad de los datos, incorporando tecnología de código de barras o RFID para rastrear los productos.
- o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben implementar sistemas de gestión de calidad con referencia a ISO 9001, ISO/IEC 17025, ASTM E2554 y GB/T 27025-2019 para garantizar la trazabilidad a lo largo de todo el proceso.

8.4 Normas ambientales y de seguridad

La producción y el uso de cátodos de tungsteno de bario implican materiales tóxicos y eliminación de desechos, y se deben seguir estrictas normas ambientales y de seguridad.

8.4.1 Tratamiento de seguridad y especificaciones de protección ambiental para compuestos de bario

- **Manejo seguro:**
 - o **Estándar:**
 - **EN 374 Guantes de protección contra productos químicos peligrosos y microorganismos**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos para la permeabilidad de los guantes protectores a productos químicos como compuestos de bario, lo que garantiza la seguridad del operador.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Idoneidad:** Adecuado para la protección del personal durante la preparación e impregnación de soluciones de compuestos de bario.
- **OSHA 1910.1200 Norma de comunicación de peligros**
 - **Descripción:** Requiere identificación, capacitación y gestión de hojas de datos de seguridad (SDS) de productos químicos peligrosos como compuestos de bario.
 - **Aplicabilidad:** Asegúrese de que el personal en la producción de cátodos de bario y tungsteno comprenda los riesgos de toxicidad de los compuestos de bario.
- **OSHA 1910.1450 Exposición ocupacional a productos químicos peligrosos en laboratorios**
 - **Descripción:** Especifica la manipulación segura y las medidas de protección de los productos químicos (como los compuestos de bario) en los laboratorios.
 - **Aplicabilidad:** Guiar la gestión segura de los entornos de laboratorio en la producción de cátodos de bario y tungsteno.
- **GB 30000.1-2024 Reglas para la clasificación y etiquetado de productos químicos - Parte 1: Reglas generales**
 - **Descripción:** Esta norma nacional china reemplaza a la GB 13690-2009 y especifica los requisitos de clasificación, etiquetado y hoja de datos de seguridad (SDS) para productos químicos peligrosos como compuestos de bario.
 - **Aplicabilidad:** Guía el etiquetado de seguridad y las prácticas operativas para compuestos de bario en la producción de cátodos de tungsteno de bario, con una fecha de implementación del 1 de agosto de 2025.
 - **Requisitos clave:** SDS compatible con el estándar para compuestos de bario y capacitación para el personal.
- **GB/T 16483-2008 Hoja de datos de seguridad para productos químicos: contenido y orden de las secciones**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos de contenido y formato de la ficha de datos de seguridad química, que es aplicable a la gestión de la seguridad de los compuestos de bario.
 - **Aplicabilidad:** Garantizar la transparencia en la información de seguridad de los compuestos de bario en la producción de cátodos de bario y tungsteno.
- o **Requisitos:** Los compuestos de bario (p. ej., BaCl_2) son tóxicos y la operación debe llevarse a cabo en campanas extractoras, y los trabajadores deben usar equipo de protección (p. ej., guantes, máscaras) de acuerdo con EN 374, OSHA 1910.1200, OSHA 1910.1450, GB 30000.1-2024 y GB / T 16483-2008.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Método:** Se utilizó un sistema cerrado para preparar e impregnar una solución de compuesto de bario para evitar fugas y volatilización.
- o **Proceso de verificación:** A través del monitoreo de la calidad del aire (concentración de Ba^{2+} por debajo de los límites seguros, consulte la norma OSHA 1910.1000 sobre contaminantes del aire y GBZ 2.1-2019 "Límites de exposición ocupacional para agentes peligrosos en el lugar de trabajo - Parte 1: Agentes químicos peligrosos" garantiza un entorno operativo seguro.
- **Especificaciones de protección ambiental:**
 - o **Estándar:**
 - **Directiva de restricción de sustancias peligrosas RoHS de la UE, 2011/65/UE**
 - **Descripción:** Restringir el uso de sustancias peligrosas (como compuestos de bario) en productos electrónicos, lo que requiere que el tratamiento de líquidos residuales cumpla con los estándares ambientales.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para el tratamiento de líquidos residuales y residuos en la producción de cátodos de tungsteno de bario.
 - **Registro, evaluación, autorización y restricción de productos químicos de REACH de la UE, CE 1907/2006**
 - **Descripción:** Requiere el registro y la evaluación de riesgos de productos químicos como los compuestos de bario para garantizar la seguridad ambiental.
 - **Aplicabilidad:** Guiar el proceso de recuperación y tratamiento de residuos compuestos de bario.
 - **ISO 14040 Gestión Ambiental - Evaluación del Ciclo de Vida - Principios y Marco**
 - **Descripción:** Guiar la evaluación del impacto ambiental del proceso productivo, optimizando la eliminación de residuos y la utilización de recursos.
 - **Aplicabilidad:** Es adecuado para la gestión ambiental de todo el ciclo de vida de la producción de cátodos de tungsteno de bario.
 - **EPA 40 CFR Parte 261 Identificación y listado de desechos peligrosos**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos para la identificación y eliminación de desechos peligrosos, incluidos los desechos compuestos de bario.
 - **Aplicabilidad:** Guiar el proceso de clasificación y tratamiento de los residuos de producción de cátodos de bario y tungsteno.
 - **GB 18597-2023 Especificación técnica para el control de la contaminación de residuos peligrosos**
 - **Descripción:** Esta norma nacional china especifica los requisitos para la recolección, almacenamiento, transporte y tratamiento de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

residuos peligrosos, que es adecuada para la gestión ambiental de los residuos compuestos de bario.

- **Aplicabilidad:** Guiar el tratamiento estandarizado de residuos peligrosos en la producción de cátodos de bario y tungsteno.
- **GB 5085.7-2019 Normas de identificación de residuos peligrosos - Especificaciones generales**
 - **Descripción:** Especifica los métodos y estándares de identificación de desechos peligrosos, que son aplicables a la clasificación de desechos compuestos de bario.
 - **Aplicabilidad:** Garantizar la clasificación y el manejo adecuados de los residuos de producción de cátodos de tungsteno y bario.
- o **Requisitos:** El líquido residual compuesto de bario debe cumplir con las regulaciones EU RoHS, EU REACH, EPA 40 CFR Parte 261, GB 18597-2023 y GB 5085.7-2019, y no debe descargarse directamente, y el contenido de metales pesados debe ser inferior al estándar de emisión.
- o **Métodos:** Los iones Ba^{2+} se recuperaron por precipitación química o intercambio iónico, y se requirió el tratamiento de líquidos residuales para cumplir con EU REACH, EPA 40 CFR Parte 261 y GB 18597-2023.
- o **Proceso de validación:** Análisis de componentes de líquidos residuales utilizando ICP-OES (de acuerdo con ASTM E1479 y GB / T 4181-2017) para garantizar que las emisiones cumplan con EU RoHS, EU REACH, GB 18597-2023 y GB 5085.7-2019.
- o **Guía de implementación:** Los fabricantes deben capacitar a los operadores, establecer procedimientos de eliminación de desechos, someterse a inspecciones ambientales periódicas y cumplir con las normas ISO 14001, GB 18597-2023 y GB 5085.7-2019.

8.4.2 Directrices de cumplimiento en la producción y el uso

- **Cumplimiento de la producción:**
 - o **Estándar:**
 - **ISO 14001 Sistemas de gestión ambiental - Requisitos con orientación para su uso**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos del sistema de gestión ambiental y guía el control del consumo de energía y las emisiones en el proceso de producción.
 - **Idoneidad:** Adecuado para instalaciones de producción de cátodos de tungsteno y bario, lo que reduce el impacto ambiental.
 - **IEC 62474 Declaración de materiales para productos de y para la industria electrotécnica**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Descripción:** Requiere declaraciones de materiales en electrónica, como compuestos de bario, que evalúen los impactos ambientales y de seguridad.
- **Aplicabilidad:** Guiar la gestión del cumplimiento de materiales en la producción de cátodos de tungsteno de bario.
- **Sistemas de gestión de la energía ISO 50001 - Requisitos con orientación para su uso**
 - **Descripción:** Orientación sobre la gestión energética, optimizando la eficiencia energética en los procesos productivos.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para procesos de sinterización y tratamiento térmico a alta temperatura en la producción de cátodos de tungsteno y bario.
- **GB/T 24001-2016 Sistemas de gestión ambiental: requisitos con orientación de uso**
 - **Descripción:** El estándar de la industria china, equivalente a ISO 14001, guía la gestión ambiental en el proceso de producción.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para la gestión del cumplimiento ambiental en instalaciones de producción de cátodos de tungsteno y bario.
- **GB/T 23331-2020 Sistemas de gestión de energía: requisitos con orientación de uso**
 - **Descripción:** El estándar de la industria china, equivalente a ISO 50001, guía la gestión de la eficiencia energética en el proceso de producción.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para la optimización de procesos a alta temperatura en la producción de cátodos de tungsteno con bario.
- o **Requisitos:** Las instalaciones de producción deben cumplir con las normas ISO 14001, ISO 50001, GB/T 24001-2016 y GB/T 23331-2020 para reducir el consumo de energía y las emisiones, y los materiales deben cumplir con los requisitos de la declaración IEC 62474.
- o **Método:** Se utilizan equipos de ahorro de energía (como hornos de sinterización a baja temperatura) y procesos químicos ecológicos para reducir la huella de carbono y cumplir con los requisitos de evaluación del ciclo de vida ISO 14040 y GB/T 24001-2016.
- o **Proceso de validación:** Analizar el impacto ambiental de la producción a través de una evaluación del ciclo de vida (ACV, de acuerdo con la norma ISO 14040) y optimizar el proceso.
- **Cumplimiento de uso:**
 - o **Estándar:**
 - **IEC 60601-1 Equipo eléctrico médico - Parte 1: Requisitos generales para la seguridad básica y el rendimiento esencial**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

en.com

www.chinatungsten.com

chinatungsten.com

- **Descripción:** Se requiere que el entorno operativo del cátodo mantenga un alto vacío para evitar la contaminación por gases residuales y garantizar un uso seguro.
- **Idoneidad:** Adecuado para el funcionamiento del cátodo de tungsteno con bario en equipos médicos e industriales.
- **ISO 20431 Tecnología de vacío - Calibración de vacuómetros**
 - **Descripción:** Garantice la precisión del equipo de prueba de ambiente de vacío y mantenga la estabilidad de la operación del cátodo.
 - **Idoneidad:** Adecuado para la gestión del entorno operativo del cátodo en tubos de microondas y microscopios electrónicos.
- **IEC 60068-2-64 Pruebas ambientales - Parte 2-64: Vibración, banda ancha aleatoria y orientación**
 - **Descripción:** Especifica los métodos de prueba de dispositivos electrónicos en entornos de vibración para garantizar la estabilidad del cátodo en entornos dinámicos.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para la gestión del entorno operativo de cátodos de tungsteno de bario en sistemas aeroespaciales y de radar.
- **GB / T 3797-2016 Condiciones ambientales para productos eléctricos y electrónicos - Parte 2: Métodos de prueba**
 - **Descripción:** Especifica los métodos de prueba ambiental para productos eléctricos y electrónicos, incluidas las pruebas de vibración y alta temperatura, adecuados para la verificación operativa de cátodos de tungsteno de bario.
 - **Aplicabilidad:** Garantiza la estabilidad del funcionamiento del cátodo en entornos hostiles.
- o **Requisitos:** La operación del cátodo debe llevarse a cabo en un entorno de alto vacío (menos de 10^{-6} Pa) para evitar la contaminación por gases residuales, de acuerdo con los requisitos de IEC 60601-1, ISO 20431, IEC 60068-2-64 y GB / T 3797-2016.
- o **Método:** El diseño del dispositivo debe incluir un sello de vacío y un sistema de escape, y se debe realizar un mantenimiento regular para garantizar la resistencia al vacío y a las vibraciones.
- o **Proceso de verificación:** El entorno operativo se monitorea mediante un medidor de vacío, y la prueba de vibración debe cumplir con IEC 60068-2-64 y GB / T 3797-2016, y se registra el registro de mantenimiento.
- o **Guía de implementación:** Los fabricantes y usuarios deben seguir las pautas IEC, ISO y GB/T para garantizar el cumplimiento seguro en la producción y el uso.

8.4.3 Especificaciones de eliminación de residuos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estándar:**
 - o **Directiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE de la UE, 2012/19/UE**
 - **Descripción:** Se requiere que los equipos electrónicos de desecho (como los dispositivos que contienen cátodos de tungsteno de bario) se clasifiquen, reciclen y traten para evitar la contaminación ambiental.
 - **Aplicabilidad:** Es adecuado para el reciclaje y la eliminación de cátodos de tungsteno de bario de desecho.
 - o **ONU 1564 Recomendaciones de las Naciones Unidas sobre el Transporte de Mercancías Peligrosas, Compuesto de Bario, N.E.S.**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos de transporte y manipulación de residuos compuestos de bario, garantizando la seguridad y el cumplimiento.
 - **Aplicabilidad:** Guiar el proceso de transporte y manipulación de cátodos de tungsteno de bario de desecho.
 - o **Normas EPA 40 CFR Parte 262 aplicables a los generadores de residuos peligrosos**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos para la generación, almacenamiento y eliminación de residuos peligrosos, aplicables a los residuos compuestos de bario.
 - **Aplicabilidad:** Guiar la gestión estandarizada de los residuos de producción de cátodos de bario y tungsteno.
 - o **ISO 14044 Gestión Ambiental - Evaluación del Ciclo de Vida - Requisitos y Directrices**
 - **Descripción:** Guiar la evaluación del ciclo de vida de la eliminación de residuos, optimizando la recuperación de recursos y la gestión del impacto ambiental.
 - **Aplicabilidad:** Adecuado para el proceso de reciclaje y eliminación de residuos catódicos de bario y tungsteno.
 - o **GB 18597-2023 Especificación técnica para el control de la contaminación de residuos peligrosos**
 - **Descripción:** Especifica los requisitos para la recolección, almacenamiento, transporte y tratamiento de desechos peligrosos, y es adecuado para la gestión ambiental de desechos compuestos de bario.
 - **Aplicabilidad:** Guiar el tratamiento estandarizado de los residuos de producción de cátodos de bario y tungsteno.
 - o **GB 5085.7-2019 Normas de identificación de residuos peligrosos - Especificaciones generales**
 - **Descripción:** Especifica los métodos y estándares de identificación de desechos peligrosos, que son aplicables a la clasificación de desechos compuestos de bario.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Aplicabilidad:** Garantizar la clasificación y el manejo adecuados de los residuos de producción de cátodos de tungsteno y bario.
- **Requisitos:** Los cátodos de tungsteno de bario y los desechos de producción deben clasificarse y eliminarse para evitar la contaminación ambiental y cumplir con los requisitos de EU WEEE, UN 1564, EPA 40 CFR Parte 262, ISO 14044, GB 18597-2023 y GB 5085.7-2019.
- **Métodos:**
 - Recupere polvo de tungsteno y compuestos de bario para separar materiales útiles mediante craqueo a alta temperatura o extracción química.
 - Los residuos no reciclables deben almacenarse en un contenedor sellado y ser eliminados por una organización profesional de acuerdo con las normas de residuos peligrosos, cumpliendo con los requisitos de la norma ONU 1564, EPA 40 CFR Parte 262 y GB 18597-2023.
- **Proceso de verificación:** Confirme la eficiencia del reciclaje mediante el análisis de la composición de los residuos (ICP-MS, de acuerdo con ASTM E1479 y GB/T 4181-2017), documente el flujo de eliminación de residuos para cumplir con las normativas EU WEEE, EU REACH, ISO 14044, GB 18597-2023 y GB 5085.7-2019.
- **Guía de implementación:** Establezca un sistema de gestión de residuos e informe regularmente el tratamiento a los departamentos de protección ambiental para garantizar el cumplimiento de los requisitos de ISO 14001, EU WEEE, UN 1564, EPA 40 CFR Parte 262, GB 18597-2023 y GB 5085.7-2019.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Apéndice

A. Glosario

Los siguientes son términos técnicos y definiciones para cátodos de tungsteno de bario y campos relacionados, basados en estándares internacionales (por ejemplo, IEC 60050, IEEE 161) y prácticas de la industria.

- **Cátodo de tungsteno de bario:** Un cátodo emisor térmico hecho de una matriz de tungsteno porosa impregnada con compuestos de bario como el aluminato de bario-calcio, que produce electrones de alta densidad de corriente a través del calentamiento y se usa ampliamente en electrónica de vacío.
- **Emisión Termoiónica:** Fenómeno de los electrones que escapan de la barrera superficial de un material a altas temperaturas, siguiendo la ecuación de Richardson-Dushman, el mecanismo de trabajo central del cátodo de bario-tungsteno.
- **Función de trabajo:** La energía mínima requerida para que los electrones escapan de la superficie del material, medida en electronvoltios (eV), y el cátodo de bario-tungsteno reduce la función de trabajo a través de la capa activa de bario para mejorar la eficiencia de emisión.
- **Matriz de tungsteno porosa:** Una estructura porosa de tungsteno de alta pureza hecha por pulvimetalurgia para almacenar y liberar compuestos de bario, lo que afecta las propiedades de emisión y la longevidad.
- **Compuestos de bario:** como el aluminato de bario-calcio (Ba-Ca-Aluminato), impregnado en una matriz porosa de tungsteno, mediante activación térmica para formar una capa activa de baja función de trabajo.
- **Densidad de corriente de emisión:** El flujo de electrones emitido por unidad de área de la superficie del cátodo, medido en A / cm², mide la eficiencia de emisión del cátodo de bario-tungsteno.
- **Capa activa:** Una capa de baja función de trabajo formada por activación térmica en la superficie del cátodo de tungsteno de bario, que se compone principalmente de átomos de bario u óxido de bario, lo que determina el rendimiento de emisión.
- **Efecto de Envenenamiento:** Fenómeno de reducción del rendimiento de las emisiones debido a la contaminación de gases residuales (como compuestos de oxígeno y carbono) en la superficie del cátodo.
- **Proceso de Activación:** Un proceso en el que los compuestos de bario forman una capa activa en la superficie de una matriz de tungsteno controlando la temperatura y el ambiente de vacío.
- **Dispositivo de electrones de vacío:** Un dispositivo que utiliza movimiento electrónico en un entorno de vacío, como tubos de microondas y tubos de rayos X, con el cátodo de tungsteno de bario como fuente central de electrones.
- **Efecto Schottky:** Bajo el campo eléctrico aplicado, la barrera de la superficie del cátodo se reduce, lo que mejora la emisión termoiónica, que es común en aplicaciones de alta intensidad de campo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Porosidad:** El porcentaje de volumen de poros en la matriz porosa de tungsteno al volumen total, que afecta la capacidad de almacenamiento de bario y las propiedades de emisión, probado de acuerdo con ASTM E1441 y GB / T 21650.1.
- **Pulvimetalurgia:** Un método de preparación de matriz de tungsteno porosa mediante cribado, prensado y sinterización de polvo de tungsteno, que debe cumplir con GB / T 3461 y GB / T 4192.
- **Proceso de impregnación:** El proceso de llenado de una solución compuesta de bario en los poros de una matriz porosa de tungsteno se realiza en un entorno de alto vacío de acuerdo con ASTM E168.
- **Capacidad antienvenenamiento:** La capacidad del cátodo para resistir la contaminación por gases residuales se mejora mediante la optimización de las formulaciones de compuestos de bario y los tratamientos superficiales.
- **Prueba de envejecimiento:** Una prueba que simula las condiciones de operación a largo plazo para evaluar la atenuación del rendimiento de las emisiones catódicas, de acuerdo con MIL-STD-202 y JB / T 6842.
- **Modo de falla:** El mecanismo de degradación del rendimiento del cátodo, como la contaminación de la superficie, el agotamiento del bario o el daño mecánico, se analiza utilizando métodos como el análisis de árbol de fallas (FTA).
- **Entorno de alto vacío:** El entorno de baja presión requerido para operar el cátodo de bario-tungsteno, generalmente por debajo de 10^{-6} Pa, probado de acuerdo con ISO 20431.

B. Referencias

[1] Bauer, E. (1994). Microscopía de superficie con electrones de baja energía. *Revista de Física: Materia Condensada*, 6(31), 5793–5810. [2] Cronin, J. L. (1981). Cátodos dispensadores modernos. *Actas de IEE I - Dispositivos de estado sólido y electrónicos*, 128 (1), 19–32. [3] Gaertner, G. y Koops, H. W. P. (2008). Fuentes de electrones de vacío y sus materiales y tecnologías. En W. Zhou y Z. L. Wang (Eds.), *Microscopía de barrido para nanotecnología: técnicas y aplicaciones* (págs. 1-40). Salmer. [4] Gartner, G. y Barratt, D. (2010). Tecnología de cátodo dispensador para tubos de microondas de alta potencia. *Transacciones IEEE en dispositivos electrónicos*, 57 (11), 2956–2963. [5] Haas, G. A. (1972). Emisión termoiónica de los cátodos del dispensador. *Revista de Física Aplicada*, 43(6), 2643–2650. [6] Jenkins, R. O. (1955). Una revisión de los cátodos termoiónicos. *Vacío*, 5(1–2), 1–18. [7] Kim, H. J. y Lee, J. J. (2004). Análisis del agotamiento del bario en cátodos impregnados. *Ciencia aplicada de superficies*, 233 (1-4), 184-191. [8] Liu, Y. y Zhang, H. (2015). Avances en materiales catódicos para tubos de microondas de alta potencia. *Revista China de Ciencia y Tecnología del Vacío*, 35(4), 421–428. [9] Marrian, C. R. K. y Shih, A. (1996). El funcionamiento de los cátodos dispensadores recubiertos a base de tungsteno en vacío deficiente. *Transacciones IEEE en dispositivos electrónicos*, 43 (12), 2165–2170. [10] Shih, A. y Yater, J. E. (2002). Emisión de electrones secundarios de los cátodos del dispensador. *Ciencia aplicada de superficies*, 192(1–4), 192–200.

C. Normas y especificaciones de prueba

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

La siguiente es una lista detallada de estándares internacionales, industriales y chinos relacionados con los cátodos de tungsteno de bario, que cubren las pruebas de rendimiento, la fabricación, el control de calidad y las especificaciones de seguridad ambiental.

Estándares internacionales

- **IEC 60601-1 Equipo eléctrico médico - Parte 1: Requisitos generales para la seguridad básica y el rendimiento esencial**
 - o Aplicabilidad: Especifica los requisitos de rendimiento y seguridad de los cátodos de tungsteno de bario en tubos de rayos X médicos, probando la densidad de corriente de emisión y el entorno de vacío.
 - o Requisitos clave: fluctuación de corriente de transmisión inferior al 5%, grado de vacío inferior a 10^{-6} Pa.
- **Vocabulario electrotécnico internacional IEC 60050**
 - o Aplicabilidad: Proporcione definiciones de terminología relacionada con el cátodo de tungsteno de bario para garantizar la coherencia en la documentación técnica.
 - o Requisitos clave: La terminología debe cumplir con los estándares internacionales para evitar ambigüedades.
- **Sistemas de gestión de calidad ISO 9001 – Requisitos**
 - o Aplicabilidad: Guíe los sistemas de gestión de calidad en la producción de cátodos de tungsteno de bario, asegurando la consistencia de los lotes.
 - o Requisitos clave: El entorno de producción debe cumplir con los estándares ISO de sala limpia Clase 5.
- **ISO 20431 Tecnología de vacío - Calibración de vacuómetros**
 - o Idoneidad: Garantiza la precisión del vacuómetro en pruebas de cátodos de tungsteno y bario, adecuado para tubos de microondas y microscopía electrónica.
 - o Requisitos clave: La precisión de calibración del medidor debe ser superior a 0,1 Pa.
- **ISO 19444-1 Tecnología de vacío - Métodos estándar para medir el rendimiento del sistema de vacío - Parte 1: Requisitos generales**
 - o Aplicabilidad: Guiar el diseño de sistemas de vacío para el entorno operativo del cátodo de tungsteno de bario.
 - o Requisitos clave: El sistema de vacío tiene una tasa de fuga de menos de 10^{-9} Pa·m³/s.
- **ISO 16000-6 Tecnología de vacío - Bombas de vacío - Parte 6: Requisitos generales**
 - o Aplicabilidad: Guiar la evaluación del rendimiento de la bomba de vacío en la producción y prueba de cátodos de tungsteno de bario.
 - o Requisitos clave: La estabilidad de la velocidad de bombeo de la bomba de vacío es superior al 5%.

Estándar de la industria

- **Definiciones estándar IEEE 161 de términos para tubos de electrones**
 - o Aplicabilidad: Defina los parámetros de rendimiento del cátodo de tungsteno de bario, como la función de trabajo y la densidad de corriente de emisión.
 - o Requisitos clave: La prueba debe simular condiciones de pulso de alta frecuencia.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estándar IEEE 287 para métodos de prueba de tubos de microondas**
 - o Aplicabilidad: Especifica los métodos de prueba para cátodos de tungsteno de bario en tubos de microondas, como pruebas de rendimiento de emisión y vida útil.
 - o Requisitos clave: El entorno de prueba debe mantener un alto vacío y la precisión de la prueba de densidad de corriente es mejor que 0,1 mA/cm².
- **MIL-STD-810 Consideraciones de ingeniería ambiental y pruebas de laboratorio**
 - o Aplicabilidad: Adecuado para pruebas de vibración y radiación de cátodos de tungsteno de bario en el campo aeroespacial.
 - o Requisitos clave: El cátodo debe mantener un rendimiento estable en entornos de alta radiación.
- **Estándar de método de prueba MIL-STD-202 para piezas de componentes electrónicos y eléctricos**
 - o Idoneidad: Guía las pruebas de longevidad y confiabilidad de los cátodos de tungsteno con bario.
 - o Requisitos clave: Las pruebas de envejecimiento acelerado deben simular las condiciones reales de funcionamiento.
- **ASTM F83 Práctica estándar para la definición y determinación de constantes termoiónicas de emisores de electrones**
 - o Aplicabilidad: Especifica el método de prueba para la función de trabajo del cátodo de tungsteno de bario y la densidad de la corriente transmitida.
 - o Requisitos clave: La prueba debe realizarse en un entorno de alto vacío con una precisión superior a 0,01 eV.
- **Especificación estándar ASTM B760 para placas, láminas y láminas de tungsteno**
 - o Aplicabilidad: Especifica los requisitos de pureza de los materiales de tungsteno para la matriz de tungsteno porosa del cátodo de tungsteno de bario.
 - o Requisitos clave: La pureza del tungsteno debe ser superior al 99,95%.
- **Guía estándar ASTM E1441 para imágenes de tomografía computarizada (TC)**
 - o Aplicabilidad: Guía las pruebas de porosidad y distribución del tamaño de los poros de la matriz de tungsteno porosa.
 - o Requisito clave: resolución X-CT mejor que 1 μm.
- **ASTM E168 Prácticas estándar para técnicas generales de análisis termogravimétrico**
 - o Idoneidad: Análisis termogravimétrico (TGA) para guiar la cantidad de impregnación de compuestos de bario.
 - o Requisito clave: Precisión del análisis térmico superior a 0,1 mg.

Estándares nacionales y de la industria china

- **GB 4943.1-2022 Equipos de tecnología de la información - Seguridad - Parte 1: Requisitos generales**
 - o Idoneidad: Adecuado para pruebas de seguridad eléctrica y térmica de cátodos de tungsteno de bario en equipos de tecnología de la información.
 - o Requisitos clave: La temperatura de funcionamiento debe controlarse dentro de un rango seguro para evitar la descarga del arco.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GB / T 3797-2016 Condiciones ambientales para productos eléctricos y electrónicos - Parte 2: Métodos de prueba**
 - o Aplicabilidad: Guíe las pruebas de rendimiento de los cátodos de tungsteno de bario en entornos de alta temperatura, alta humedad y vibración.
 - o Requisitos clave: El cátodo debe ser estable a 2000 °C y alto vacío.
- **JB / T 6842-2018 Especificación general para dispositivos de electrones de vacío**
 - o Aplicabilidad: Especifica los requisitos de rendimiento y prueba de los cátodos de tungsteno de bario en electrónica de vacío.
 - o Requisitos clave: La densidad de corriente de transmisión debe satisfacer las necesidades de los dispositivos de alta potencia.
- **GB/T 21650.1-2008 Distribución del tamaño de los poros y porosidad de materiales sólidos mediante porosimetría de mercurio y adsorción de gases - Parte 1: Porosimetría de mercurio**
 - o Aplicabilidad: Guiar las pruebas de porosidad de sustratos porosos de tungsteno.
 - o Requisitos clave: La precisión de la medición de la porosidad debe ser superior al 1%.
- **GB / T 13247-2019 Métodos de prueba para el análisis térmico de materiales metálicos**
 - o Idoneidad: Análisis termogravimétrico (TGA) para guiar la cantidad de impregnación de compuestos de bario.
 - o Requisito clave: La precisión del análisis térmico debe ser superior a 0,1 mg.
- **GB / T 3461-2017 Polvo de tungsteno**
 - o Aplicabilidad: Especifica la distribución del tamaño de partícula y los requisitos de pureza del polvo de tungsteno.
 - o Requisitos clave: La pureza del polvo de tungsteno debe ser superior al 99,95%.
- **GB / T 4192-2010 Tungsteno sinterizado y aleación de tungsteno**
 - o Aplicabilidad: Guíe el proceso de sinterización de la matriz de tungsteno poroso de tungsteno de cátodo de bario.
 - o Requisito clave: temperatura de sinterización controlada a 1900-2050 °C.
- **GB / T 4181-2017 Métodos para el análisis químico de tungsteno y aleaciones de tungsteno**
 - o Aplicabilidad: Guíe el análisis de pureza del polvo de tungsteno y la matriz de tungsteno.
 - o Requisito clave: La precisión del análisis ICP-OES es mejor que 10 ppm.
- **GB 30000.1-2024 Reglas para la clasificación y etiquetado de productos químicos - Parte 1: Reglas generales**
 - o Aplicabilidad: Guía el etiquetado de seguridad y las prácticas operativas para compuestos de bario.
 - o Requisito clave: Proporcionar una SDS que cumpla con los estándares con una fecha de implementación del 1 de agosto de 2025.
- **GB/T 16483-2008 Hoja de datos de seguridad para productos químicos: contenido y orden de las secciones**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Aplicabilidad: Garantizar la gestión estandarizada de la información de seguridad de los compuestos de bario.
- o Requisitos clave: SDS debe incluir requisitos de toxicidad química y manejo.
- **GB 18597-2023 Especificación técnica para el control de la contaminación de residuos peligrosos**
 - o Aplicabilidad: Guía la recolección, almacenamiento y eliminación de desechos compuestos de bario.
 - o Requisitos clave: El contenido de metales pesados en el líquido residual debe ser inferior a la norma de emisión.
- **GB 5085.7-2019 Normas de identificación de residuos peligrosos - Especificaciones generales**
 - o Aplicabilidad: Estipular los requisitos de identificación y clasificación de los residuos compuestos de bario.
 - o Requisitos clave: Los materiales de desecho deben eliminarse de acuerdo con los estándares de desechos peligrosos.
- **GB/T 14815-2008 Tecnología de vacío – Vocabulario**
 - o Aplicabilidad: Defina los términos técnicos de vacío en las pruebas y operación de cátodos de tungsteno y bario.
 - o Requisitos clave: La terminología debe ser coherente con las normas internacionales.
- **GB/T 34590-2017 Tecnología de vacío: métodos de medición del rendimiento del sistema de vacío**
 - o Aplicabilidad: Pruebas de rendimiento del sistema de vacío de guía para el entorno operativo de cátodo de tungsteno y bario.
 - o Requisitos clave: El sistema de vacío tiene una tasa de fuga de menos de 10^{-9} Pa·m³/s.

D. Proveedores y recursos

- **Introducción a CTIA GROUP LTD**

CTIA GROUP LTD es un proveedor líder de cátodos de bario-tungsteno y materiales electrónicos de vacío en China. Los productos son ampliamente utilizados en tubos de microondas, tubos de rayos X, sistemas de radar, microscopios electrónicos y campos aeroespaciales. CTIA GROUP LTD se especializa en la personalización flexible de productos de tungsteno y molibdeno, proporcionando soluciones de cátodos de alto rendimiento, y puede personalizar y procesar varias especificaciones, rendimiento, tamaños y grados de productos de tungsteno y molibdeno de acuerdo con las necesidades del cliente.

Información de contacto:

Correo: sales@chinatungsten.com

Teléfono: 0592-5129696, 0592-5129595

- **CTIA GROUP LTD Electrodo de bario y tungsteno Sitios web relacionados**

Cátodo de tungsteno de bario:

<http://tungsten.com.cn/barium-tungsten-cathode.html>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Precio del tungstenoy noticias:

<http://news.chinatungsten.com/en/>

<https://www.ctia.com.cn/en/>

Productos de tungsteno y molibdeno:

<http://www.chinatungsten.com/>

E. Índice

Índice de palabras clave

- Cátodo de tungsteno de bario: 1.1, 2.1, 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 8.1, A, C, D
- Emisión termoiónica: 3.1, 3.2, 8.2, A
- Función de trabajo: 3.2, 6.1, 8.2, A
- Matriz de tungsteno poroso: 2.1, 2.3, 4.1, 6.1, 8.3, A, C, D
- Compuestos de bario: 2.1, 4.2, 6.1, 8.4, A, C, D
- Densidad de corriente de transmisión: 3.2, 5.1, 8.2, A
- Electrónica de vacío: 1.3, 5.1, 8.1, A, C, D
- Efectos de toxicidad: 3.3, 6.2, A
- Proceso de activación: 4.2, 8.3, A
- Medio ambiente y seguridad: 8.4, C, D
- Fabricación y control de calidad: 4.3, 8.3, C, D
- Pulvimetalurgia: 2.2, 4.1, 8.3, A, C
- Porosidad: 2.3, 4.1, 8.3, A, C
- Resistencia a las vibraciones: 5.4, 8.1, A

Índice de temas

- **Ciencia de los materiales:** Capítulo 2, 6.1, 8.3, A, C, D
 - o Matriz de tungsteno poroso: 2.1.1, 2.3.1, 4.1, 6.1, 8.3, C, D
 - o Propiedades del compuesto de bario: 2.1.2, 4.2, 6.1, 8.4, C, D
 - o Análisis de microestructuras: 2.3, 4.3, 6.1
- **Principio de funcionamiento:** Capítulo 3, A
 - o Teoría de la emisión termoiónica: 3.1, A
 - o Características de emisión y análisis de fallos: 3.2, 3.3, A
 - o Efecto Schottky y mejora de campo: 3.1.2, A
- **Técnicas de fabricación:** Capítulo 4, 8.3, A, C, D
 - o Formación de matriz de tungsteno poroso: 4.1, 8.3, A, C
 - o Proceso de impregnación y activación: 4.2, 8.3, A, C
 - o Control de calidad y pruebas: 4.3, 8.3, C
- **Aplicaciones:** Capítulo 5, D
 - o Tubo de microondas vs. tubo de rayos X: 5.1, D
 - o Instrumentos científicos: 5.2, D
 - o Aeroespacial y Defensa: 5.4, D
 - o Aplicaciones emergentes (por ejemplo, terahercios, propulsores iónicos): 5.5
- **Optimización del rendimiento:** Capítulo 6
 - o Eficiencia de disparo: 6.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Esperanza de vida y antienvenamiento: 6.2
- o Adaptabilidad ambiental: 6.3
- **Desafíos tecnológicos y desarrollos futuros:** Capítulo 7
 - o Costo y consistencia del material: 7.1
 - o Competencia de tecnología emergente: 7.2
 - o Direcciones futuras de la investigación: 7.3
- **Normas y especificaciones:** Capítulo 8, C
 - o Estándares internacionales y de la industria: 8.1, C
 - o Especificación de los parámetros de rendimiento: 8.2, C
 - o Fabricación y control de calidad: 8.3, C
 - o Medio ambiente y seguridad: 8.4, C
- **Proveedores y recursos:**D
 - o GRUPO CTIA LTD: D



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT